UNIVERSITE DE MONTREAL

CONTROLE DES REACTIONS ALCALIS-GRANULATS PAR L'UTILISATION D'AJOUTS MINERAUX

par

Benoit Durand

DEPARTEMENT DE GENIE MINERAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

THESE PRESENTEE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph. D)
(GENIE MINERAL)

DECEMBRE 1988

c Benoit Durand

CONTRACT REPORT NUMBER 69190-01-ST
DSS REQUISITION NUMBER 23440-6-9190
CONTRACTOR: University of Montreal

CONTROLE DES REACTIONS ALCALIS-GRANULATS PAR L'UTILISATION D'AJOUTS MINERAUX

par

Benoit Durand
DEPARTEMENT DE GENIE MINERAL
ECOLE POLYTECHNIQUE

THESE PRESENTEE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph. D)
(GENIE MINERAL)

DECEMBRE 1988

341 pp
c Benoit Durand
MICROMEDIA

MICROMEDIA

RESUME

Le but principal de cette étude sur le rôle des ajouts minéraux dans les bétons était de déterminer les mécanismes qui contribuent à réduire ou à neutraliser les expansions dues aux réactions alcalis-granulats.

Notre étude réalisée à partir de trois granulats de provenances distinctes et de deux ajouts minéraux démontre que l'addition de ces ajouts influence les paramètres suivants:

1- Le taux d'expansion due aux réactions alcalis-granulats de prismes de béton;

2- La teneur en Na^+, K^+ et OH^- de la solution interstitielle d'échantillons de pâte et de béton;

3- La perméabilité à l'azote d'échantillons de béton et;

4- La teneur en $Ca(OH)_2$ d'échantillons de pâte et de béton.

Les résultats de notre étude démontrent qu'il y a une bonne corrélation entre la réduction des expansions dues aux réactions alcalis-granulats et la réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$. Par contre, nous n'avons noté qu'une faible corrélation entre la réduction des

expansions dues aux réactions alcalis-granulats et la réduction de la perméabilité à l'azote. Nous avons également noté une certaine corrélation entre la réduction des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- de la solution interstitielle de nos échantillons de béton et la réduction d'expansion de nos prismes de béton.

Les résultats de notre étude démontrent également que la fumée de silice condensée possède la capacité de réduire de façon importante les expansions dues aux réactions alcalis-granulats de prismes de béton soumis à une cure de 38 °C et à une humidité relative supérieure à 95% et ce pourvu qu'un pourcentage de remplacement de 10% ou plus soit utilisé. A 10% et plus de remplacement, la présence de fumée de silice a contribué à diminuer les expansions dues à la réaction alcalis-granulats ainsi que les teneurs en Na^+, K^+ et OH^- de la solution interstitielle, la teneur en $Ca(OH)_2$ ainsi que la perméabilité de nos échantillons, quelque soit le granulat utilisé.

ABSTRACT

The main purpose of this study on the role of mineral admixtures was to determine which mechanisms counteract the expansion due to alkali-aggregate reactivity.

Our study shows that the addition of two different mineral admixtures to concrete made with coarse aggregates from three different sources influences with each of the following parameters:

1-The expansions due to alkali-aggregate reaction of concrete prisms;

2-The Na^+, K^+ and OH^- concentration of the pore solution of paste and concrete samples;

3-The nitrogen permeability of concrete samples;

4-The $Ca(OH)_2$ content of paste and concrete samples;

The results from our study show a good correlation between the reduction of the expansions due to the alkali-aggregate reaction and the reduction in the $Ca(OH)_2$ content. On the other hand, a poor correlation is obtained between the reduction of the expansions due to the alkali-aggregate reaction and the reduction in the nitrogen per-

meability. A certain correlation is obtained between the reduction in the Na^+, K^+ and OH^- concentrations of the pore solution of the concrete samples and the reduction in expansion of the concrete prisms.

The results of our study also show that the condensed silica fume can reduce markedly the expansions due the alkali-aggregate reactions of concrete prisms cured at 38 °C and over 95% R.H. as long as a replacement level of 10% or more is used. With replacement levels of 10% or more, the condensed silica fume has reduced the expansion due the alkali-aggregate reaction and also the Na^+, K^+ and OH^- ions concentrations of the pore solution, the $Ca(OH)_2$ content and the nitrogen permeability of our samples.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Jean Bérard, Ph. D., professeur agrégé au département de Génie Minéral et M. Richard Roux, Ing., M. Sc. A., professeur agrégé au département de Génie Civil qui ont été les directeurs de cette étude, et qui, par leurs conseils et par leur aide, ont grandement contribué à cette étude.

Je tiens à remercier le Ministère des Transports du Québec pour son soutien financier et technique et tout particulièrement MM. Guy Fréchette, Guy Dallaire et Daniel Vézina.

Je désire également remercier CANMET pour l'octroi d'une subvention et tout particulièrement M. James A. Soles pour son précieux dévouement.

Je souhaite remercier la Compagnie Ciment Canada Lafarge pour sa contribution et tout particulièrement le Dr. Hung Chen pour son aimable collaboration.

Je désire exprimer toute ma reconnaissance au personnel d'Ecole Polytechnique et tout particulièrement au personnel des départements

de Génie Minéral et de Génie Civil.

Cette étude a été rendue possible grâce à des bourses d'études supérieures du Conseil canadien en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et du Ministère de l'enseignement supérieur et de la science du Québec (Fonds FCAR).

TABLE DES MATIERES

PAGE

RESUME.....iv

ABSTRACT.....vi

REMERCIEMENTS.....vii

TABLE DES MATIERES.....x

LISTE DES FIGURES.....xvii

LISTE DES TABLEAUX.....xxvii

LISTE DES ANNEXES.....xxx

LISTE DES ABREVIATIONS.....xxxi

CHAPITRE I- Introduction.....1

I.1- Travaux antérieurs.....1

I.2- Présentation de l'étude effectuée.....2

I.3- Les hypothèses de travail.....5

I.4- Expérimentations.....10

CHAPITRE II- L'hydratation du ciment portland.....13

II.1- Avant propos.....13

II.2- Le ciment portland.....13

II.3- La chimie de l'hydratation du ciment portland.....14

II.4- La composition de la solution interstitielle.....18

II.5- La composition des phases de la pâte durcie.....19

II.6- La structure et la porosité de la pâte durcie.....22

II.7- Résumé du chapitre.....30

PAGE

CHAPITRE III- L'influence des ajouts minéraux sur la composition de la pâte durcie.....33

III.1-L'influence sur la composition des phases solides.....33

III.1.1- Revue des hypothèses.....33

III.1.1.1- L'emprisonnement des alcalis dans les C-S-H.....34

III.1.1.2- Le rapport C/S dans les C-S-H.....36

III.1.1.3- Le rôle du $Ca(OH)_2$.....37

III.1.2- Les méthodes de mesure du rapport C/S.....38

III.2- L'influence des ajouts sur la composition de la solution interstitielle.....42

III.2.1- La solution interstitielle.....42

III.2.2- Les méthodes d'extraction et d'analyse de la solution interstitielle.....42

CHAPITRE IV- La porosité et la perméabilité.....46

IV.1- La porosité due aux phases solides.....46

IV.2- La porosité capillaire.....47

IV.3- L'hypothèse de l'influence de la perméabilité sur les réactions alcalis-granulats.....51

IV.4- Les méthodes de caractérisation de la porosité.....53

IV.4.1- La porosité totale mesurée par séchage.....53

IV.4.2- La méthode d'échange eau-méthanol.....55

IV.4.3- La porosimétrie au mercure.....56

IV.4.4- La méthode de condensation capillaire.....59

IV.4.5- La microscopie électronique.....62

PAGE

IV.5- La perméabilité.....63

IV.6- Les méthodes de mesure de la perméabilité.....65

IV.6.1- La perméabilité à l'eau.....65

IV.6.2- La perméabilité à la vapeur.....70

IV.6.3- La perméabilité aux gaz.....70

CHAPITRE V- Résultats des essais d'expansion.....72

V.1- Le granulat de Trois-Rivières.....72

V.2- Le granulat d'Ottawa.....75

V.3- Le granulat de Sherbrooke.....78

V.4- Discussion.....80

CHAPITRE VI- Résultats des essais d'extraction de la solution interstitielle.....107

VI.1- Résultats obtenus pour les pâtes.....107

VI.1.1- Pâtes avec la fumée de silice condensée.....107

VI.1.2- Pâtes avec le laitier silicaté granulé.....109

VI.2- Résultats obtenus pour les bétons.....110

VI.2.1- Le granulat de Trois-Rivières.....110

VI.2.2- Le granulat d'Ottawa.....111

VI.2.3- Le granulat de Sherbrooke.....112

VI.3- Analyse des résultats.....113

CHAPITRE VII- Résultats des essais de perméabilité à l'azote.....144

VII.1- Le granulat de Trois-Rivières.....145

VII.2- Le granulat d'Ottawa.....145

VII.3- Le granulat de Sherbrooke.....146

VII.4- Discussion.....147

CHAPITRE VIII- Résultats des analyses thermogravimétriques.....154

VIII.1- Les pâtes.....154

VIII.2- Les bétons.....155

VIII.2.1- Le granulat de Trois-Rivières.....155

VIII.2.2- Le granulat d'Ottawa.....155

VIII.2.3- Le granulat de Sherbrooke.....156

CHAPITRE IX- Résultats des analyses par diffractions des rayons-X.....165

CHAPITRE X- Résultats des observations effectuées au microscope électronique à balayage.....176

CHAPITRE XI- Résultats des examens pétrographiques.....189

XI.1- Le granulat de Trois-Rivières.....189

XI.2- Le granulat d'Ottawa.....192

XI.3- Le granulat de Sherbrooke.....193

XI.4- Discussion.....195

CHAPITRE XII- Discussion et conclusions.....203

XII.1- Synthèse des résultats.....204

XII.2- Corrélations.....206

XII.3- Conclusions.....209

XII.4- Recommandations.....211

PAGE

BIBLIOGRAPHIE.....223

ANNEXE A- Description des essais d'expansion.....233

A.1- Caractéristiques des mélanges.....233

A.1.1- Matériaux utilisés.....233

A.1.2- Proportions des mélanges.....234

A.2- Caractéristiques de la cure.....234

A.3- Mode opératoire.....234

A.4- Remarque.....235

A.5- Description détaillée des mélanges.....236

A.5.1- Le granulat de Trois-Rivières.....237

A.5.2- Le granulat d'Ottawa.....238

A.5.3- Le granulat de Sherbrooke.....240

A.6- Description détaillée des ajouts minéraux.....242

A.6.1- La fumée de silice condensée.....242

A.6.2- Le laitier silicaté granulé.....243

A.7- Les autres ajouts.....244

A.7.1- La poussière de quartz.....244

A.7.2- Le résidu d'aciérie (acier inoxydable).....245

A.7.3- Le résidue d'une aciérie.....245

A.7.4- La poussière calcaire.....246

A.7.5- Les ajouts chimiques.....246

PAGE

ANNEXE B- Description des essais d'extraction de la solution interstitielle.....260

B.1- Caractéristiques des mélanges.....260

B.1.1- Matériaux utilisés.....260

B.1.2- Proportions des mélanges.....261

B.2- Caractéristiques de la cure.....261

B.3- Mode opératoire.....261

B.4- Remarque.....262

B.5- Description détaillée de l'appareil d'extraction.....263

B.6- Description des méthodes d'analyse de la solution interstitielle.....264

ANNEXE C- Description des essais de perméabilité à l'azote.....267

C.1- Description des échantillons.....267

C.2- Description du perméamètre.....268

C.3- Principe du débitmètre.....270

ANNEXE D- Détails concernant les thermoanalyses.....275

ANNEXE E- Détails concernant les diffractions-X.....276

ANNEXE F- Détails concernant les observations effectuées par microscopie électronique à balayage.....277

ANNEXE G- Détails concernant les examens pétrographiques.....279

PAGE

ANNEXE H- Note sur l'essai d'expansion non-normalisé d'un mini-prisme de calcaire.....282

ANNEXE I- Résultats des essais d'expansion des sables.....286

ANNEXE J- Tableaux des données.....291

LISTE DES FIGURES

FIGURE: PAGE

1-Programme des essais.....11

2-Graphique montrant la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment portland en fonction du temps écoulé depuis le gâchage.....23

3-Représentation schématique du processus d'hydratation du ciment portland.....26

4-Représentation schématique de différents modèles de C-S-H.....27

5-Différentes classes dimensionnelles des solides et des pores dans une pâte de ciment hydraté.....49

6-Développement de la résistance de cylindres de béton avec différents rapports eau-ciment.....50

7-Relation entre la perméabilité et la porosité capillaire de pâtes de ciment.....52

8-Exemple d'une courbe de distribution de la taille des pores obtenue par porosimétrie au mercure.....57

9-Exemple de courbe de distribution de la taille des pores obtenue par condensation capillaire.....61

10-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et fumée de silice condensée.....84

11-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et laitier silicaté granulé.....85

12-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et Li_2CO_3.....86

13-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et silice colloïdale.....87

FIGURE: PAGE

14-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et NaOH.....88

15-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et poussière de quartz.....89

16-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et laitier d'aciérie.....90

17-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et poussière calcaire.....91

18-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat d'Ottawa et fumée de silice condensée.....92

19-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat d'Ottawa et laitier silicaté granulé.....93

20-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Sherbrooke et fumée de silice condensée.....94

21-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Sherbrooke et laitier silicaté granulé.....95

22-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Sherbrooke et laitier d'aciérie productrice d'acier inoxydable.....96

23-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et fumée de silice condensée.....98

24-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et laitier silicaté granulé.....99

FIGURE: PAGE

25-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et Li_2CO_3.....100

26-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et divers ajouts.....101

27-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat d'Ottawa et fumée de silice condensée.....102

28-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat d'Ottawa et laitier silicaté granulé.....103

29-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Sherbrooke et fumée de silice condensée.....104

30-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Sherbrooke et laitier silicaté granulé.....105

31-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Sherbrooke et laitier d'aciérie productrice d'acier inoxydable.....106

32-Evolution de la concentration des ions pour les pâtes pures âgées de 0 à 21 jours.....119

33-Evolution de la concentration des ions pour les pâtes pures âgées de 0 à 6 mois.....120

34-Evolution de la concentration des ions pour les pâtes contenant 10% de fumée de silice condensée (FSC) et âgées de 0 à 21 jours.....121

35-Evolution de la concentration des ions pour les pâtes contenant 10% de FSC et âgées de 0 à 6 mois.....122

36-Histogramme de la concentration des ions pour les pâtes contenant 5%, 10% et 15% de FSC et âgées de 6 mois.....123

FIGURE: PAGE

37-Histogramme de la concentration des ions d'extraction de solution interstitielle pour les pâtes contenant 5%, 10% et 15% de laitier silicaté granulé et âgées de 6 mois.....124

38-Histogramme des teneurs en Na et K des phases solides des échantillons des essais d'extraction. (Pâte et 5%, 10% 15% de FSC, à 6 mois).....125

39-Histogramme des teneurs en Na et K des phases solides des échantillons des essais d'extraction. (Pâte et 5%, 10% 15% de LSG, à 6 mois).....126

40-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et contenant 5% et 10% de FSC.....127

41-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et contenant 5% et 10% de LSG.....128

42-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et contenant 5% et 10% de FSC.....129

43-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et contenant 5%, 10% et 15% de LSG.....130

44-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et contenant 5% et 10% de FSC (à 6 mois).....131

45-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et contenant 5%, 10% et 15% de LSG.....132

46-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les pâtes avec 5%, 10% et 15% de FSC.....134

FIGURE: PAGE

47-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les pâtes avec 5%, 10% et 15% de LSG.....135

48-Histogramme de l'augmentation des teneurs en Na et K pour les pâtes avec 5%, 10% et 15% de FSC.....136

49-Histogramme de l'augmentation des teneurs en Na et K pour les pâtes avec 5%, 10% et 15% de LSG.....137

50-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et 5% et 10% de FSC.....138

51-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et 5% et 10% de LSG.....139

52-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et 5% et 10% de FSC.....140

53-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et 5%, 10% et 15% de LSG.....141

54-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et 5% et 10% de FSC.....142

55-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et 5%, 10% et 15% de LSG.....143

56-Histogramme de réduction de perméabilité à l'azote pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et des ajouts de LSG, FSC et Li_2CO_3.....150

FIGURE: PAGE

57-Histogramme des perméabilités à l'azote pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et des ajouts de LSG et de FSC.....151

58-Histogramme des perméabilités à l'azote pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et des ajouts de LSG et de FSC.....152

59-Histogramme montrant la variation du coefficient de perméabilité à l'azote mesuré en fonction du gradient de pression.....153

60-Histogramme des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Pâtes avec ajouts, à 6 mois).....159

61-Histogramme de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ pour les pâtes avec ajouts.....161

62-Histogramme des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Bétons fabriqués avec le granulats de Trois-Rivières et avec ajouts, à 6 mois).....162

63-Histogramme des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Bétons fabriqués avec le granulats d'Ottawa et avec ajouts, à 6 mois).....163

64-Histogramme des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Bétons fabriqués avec le granulats de Sherbrooke et avec ajouts, à 6 mois).....164

65-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte pure, à 6 mois.....167

66-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 5% de FSC, à 6 mois.....168

67-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 10% de FSC, à 6 mois.....169

68-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 15% de FSC, à 6 mois.....170

FIGURE PAGE

69-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 5% de LSG, à 6 mois.....171

70-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 10% de LSG, à 6 mois.....172

71-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 15% de LSG, à 6 mois.....173

72-Comparaison de l'intensité du pic principal du $Ca(OH)_2$ pour la pâte pure et les pâtes avec 5%, 10% et 15% de FSC.....174

73-Comparaison de l'intensité du pic principal du $Ca(OH)_2$ pour la pâte pure et les pâtes avec 5%, 10% et 15% de LSG.....175

74-Photographie prise au MEB montrant du gel calco-silico-alcalin à la surface externe d'un béton fabriqué avec le granulat de Trois-Rivières.....178

75-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 74.....178

76-Photographie prise au MEB montrant de l'ettringite fibreuse au sein d'un pore du même échantillon que la figure précédente.....179

77-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de l'ettringite présentée à la figure 78.....179

78-Photographie prise au MEB montrant de l'ettringite ou ettringo-thaumasite en fines aiguilles au sein d'un pore d'un béton fabriqué avec le granulat de Trois-Rivières combiné avec un ajout de lithium.....180

79-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de l'ettringite ou ettringo-thaumasite présentée à la figure 78.....180

FIGURE: PAGE

80-Photographie prise au MEB montrant une veinule de gel calco-silico-alcalin au sein du granulat de Trois-Rivières.....181

81-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la veinule de gel présentée à la figure 80.....181

82-Photographie prise au MEB montrant le résidu insoluble du granulat de Trois-Rivières.....182

83-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du résidu insoluble présenté à la figure 82.....182

84-A,B,C-Photographies prises au MEB montrant l'aspect morphologique d'un gel calco-silico-alcalin à la surface externe d'un béton fabriqué avec le granulat de Trois-Rivières combiné avec un ajout de poussière de quartz.....183

84-B.....184

84-C.....184

85-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté aux figures 84 A, B et C.....183

86-Photographie prise au MEB montrant du gel calco-silico-alcalin au sein d'un pore d'un béton fabriqué avec le granulat de Sherbrooke combiné avec un ajout de laitier silicaté granulé.....185

87-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 86.....185

88-Photographie prise au MEB montrant le résidu insoluble du granulat d'Ottawa.....186

89-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du résidu insoluble présenté à la figure 88.....186

90-Photographie prise au MEB montrant du gel calco-silico-alcalin au sein d'un pore d'un béton fabriqué avec le granulat d'Ottawa combiné avec un ajout de laitier silicaté granulé.....186

FIGURE: PAGE

91-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 90.....187

92-Photographie prise au MEB montrant à fort grossissement les cristaux cités à la figure 90.....188

93-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du cristal présenté à la figure 92.....188

94-Relation entre le pourcentage d'ajout et la variation des différents paramètres mesurés pour les bétons fabriqués la FSC.....216

95-Relation entre le pourcentage d'ajout et la variation des différents paramètres mesurés pour les bétons fabriqués avec le LSG.....217

96-Corrélation entre la réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ et la réduction des expansions.....218

97-Corrélation entre la réduction de la perméabilité à l'azote et la réduction des expansions.....219

98-Corrélation entre la réduction des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- et la réduction des expansions.....220

99-Corrélation entre la réduction des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- et la réduction des expansions (Bétons avec FSC).....221

100-Corrélation entre la réduction des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- et la réduction des expansions (Bétons avec FSC).....222

A.1-Photographie du granulat de Trois-Rivières en lame mince.....255

A.2-Photographie du granulat d'Ottawa en lame mince.....256

A.3-Photographie du granulat d'Ottawa en lame mince.....256

FIGURE: PAGE

A.4-Photographie du granulat de Sherbrooke en lame mince.....257

A.5-Photographie du granulat de Sherbrooke en lame mince.....257

A.6-Exemple de mélange type.....258

A.7-Photographie d'une série de prismes et de cylindres de béton fabriqués à partir d'un mélange type.....259

A.8-Photographie d'un contenant en plastique servant à l'entreposage à 38 °C des prismes des essais d'expansion.....259

B.1-Schéma de l'appareil d'extraction de la solution interstitielle.....265

B.2-Photographie de l'appareil d'extraction de la solution interstitielle.....266

C.1-Schéma du perméamètre à azote.....273

C.2-Photographie du perméamètre à azote.....274

H.1-Schéma du montage de l'essai d'expansion du mini-prisme.....285

H.2-Résultats de l'essai d'expansion du mini-prisme.....286

I.1-Evolution de l'expansion pour le sable du Témiscamingue.....289

I.2-Evolution de l'expansion pour le sable de St-Félix de Valois.....290

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU: PAGE

1-Limites approximatives de la composition chimique du ciment portland.....15

2-Porosité de pâtes pures et de pâtes contenant 40% de cendres volantes à différents temps de cure.....48

3-Diminution de la perméabilité de pâtes de ciment en fonction du degré d'hydratation.....66

4-Comparaison de la perméabilité des roches et de pâtes de ciment.....67

5-Valeurs typiques de perméabilité de bétons de barrages.....68

6-Concentrations en ions des pâtes.....116

7-Concentrations en ions des bétons.....117

8-Teneurs en Na et K des phases solides des pâtes.....118

9-Coefficients de perméabilité des bétons.....149

10-Teneurs en $Ca(OH)_2$ des pâtes.....157

11-Teneurs en $Ca(OH)_2$ des bétons.....158

12-Résultats des examens pétrographiques (Granulat de Trois-Rivières).....200

13-Résultats des examens pétrographiques (Granulat d'Ottawa).....201

14-Résultats des examens pétrographiques (Granulat de Sherbrooke).....202

A.1-Caractéristiques du ciment et des ajouts minéraux.....247

A.2-Caractéristiques des sables.....248

TABLEAU: PAGE

A.3-Caractéristiques du superplastifiant.....248

A.4-Caractéristiques des granulats.....249

A.5-Caractéristiques des autres ajouts minéraux.....250

A.6-Limites d'expansion maximales suggérées pour les divers essais pour la réaction alcalis-granulats.....251

A.7-Classes d'exposition spécifiées par la norme CSA A23.1-M77.....252

A.8-Résistances à la compression simple.....253

A.9-Résistances à la compression simple.....254

J.1-Expansion Trois-Rivières + FSC et LSG.....292

J.2-Expansion Trois-Rivières + ajouts divers.....293

J.3-Expansion Trois-Rivières + ajouts divers.....294

J.4-Expansion Ottawa + FSC.....295

J.5-Expansion Ottawa + LSG.....296

J.6-Expansion Sherbrooke + FSC.....297

J.7-Expansion Sherbrooke + LSG.....298

J.8-Expansion Sherbrooke + Laitier AS.....299

J.9-Réduction des expansions T.-R. + ajouts.....300

J.10-Réduction des expansions T.-R. + ajouts.....300

J.11-Réduction des expansions Ottawa + FSC et LSG.....301

J.12-Réduction des expansions She. + FSC et LSG.....302

J.13-Réduction des expansions She. + Laitier AS.....302

J.14-Concentrations des ions SI des pâtes pures.....303

J.15-Concentrations des ions SI des pâtes + FSC.....304

J.16-Concentrations des ions SI des pâtes à 6 mois.....305

TABLEAU: PAGE

J.17-Teneurs en alcalis des phases solides des pâtes.....305

J.18-Concentrations des ions SI des bétons.....306

J.19-Coefficients de perméabilité des bétons.....307

J.20-Expansions des sables.....308

J.21-Données des diffractions-X des pâtes.....309

J.22-Variation des divers paramètres vs % ajouts.....310

LISTE DES ANNEXES

PAGE

ANNEXE A- Description des essais d'expansion.....233

ANNEXE B- Description des essais d'extraction de la solution interstitielle.....260

ANNEXE C- Description des essais de perméabilité à l'azote.....267

ANNEXE D- Détails concernant les thermoanalyses.....275

ANNEXE E- Détails concernant les diffractions-X.....276

ANNEXE F- Détails concernant les observations effectuées par microscopie électronique à balayage.....277

ANNEXE G- Détails concernant les examens pétrographiques.....279

ANNEXE H- Note sur l'essai d'expansion non-normalisé d'un mini-prisme de calcaire.....282

ANNEXE I- Résultats des essais d'expansion des sables.....287

ANNEXE J- Tableaux des données.....291

LISTE DES ABREVIATIONS

Å: Angstroem (10^{-10} mètre)

A: Al_2O_3

AFm: Monosulfoaluminate de calcium hydraté

AFt: Tetrasulfoaluminate de calcium hydraté

AQU.: Aqueux

ASTM: American Society for Testing and Materials

C: CaO

cm: Centimètre

cm/s: Centimètre/seconde

CSA: Association canadienne de normalisation

C-S-H: Silicates de calcium hydratés

C/S: CaO/SiO_2

CTL: Contrôle

E/C: Eau-ciment (rapport en poids)

équ.: Equivalent

F: Fe_2O_3

FSC: Fumée de silice condensée

g/cm³: Gramme/centimètre cube

H: H_2O

kg: Kilogramme

kN: Kilonewton

lb/po.²: Livre/pouce carré

LSG: Laitier silicaté granulé

M: MgO

MEA: Microscopie électronique analytique

MEB: Microscope électronique à balayage

MET: Microscope électronique à transmission

mg: Milligramme

ml: Millilitre

mm: Millimètre

MPa: Mégapascal

m^2/kg: Mètre carré/kilogramme

N/mm^2: Newton/millimètre carré

Pâte: Pâte de ciment hydratée ou pâte de ciment durcie

p.p.m.: Partie/million

Rc: Réduction d'alcalinité

R.I.: Résidus insolubles

S: SiO_2

S: $\overline{S}O_4$

Sc: Silice dissoute

SDE: Spectromètre à dispersion d'énergie

SI: Solution interstitielle

SSLO: Spectromètre à sélection de longueur d'onde

μm: Micromètre

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1- TRAVAUX ANTERIEURS

Dans un précédent rapport intitulé "Le rôle des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats" (Durand, 1985), nous avons d'abord traité de l'origine du ciment portland et des ajouts minéraux, puis nous en avons défini la composition chimique et minéralogique ainsi que les propriétés physico-chimiques. Nous y avons abordé le problème des réactions alcalis-granulats en définissant l'origine et la nature des alcalis dans le ciment portland et nous avons brièvement expliqué pourquoi certains granulats étaient potentiellement susceptibles de réagir en présence de ces alcalis. Nous avons présenté les hypothèses pouvant expliquer les raisons pour lesquelles certains ajouts minéraux réduisent les expansions dues aux réactions alcalis-granulats ainsi que les résultats de divers essais concernant 3 granulats réactifs aux alcalis, soit:

1-Un calcaire siliceux de la région de Trois-Rivières, Québec;

2-Un calcaire dolomitique de la région de Kingston, Ontario, et,

3-Une argilite de la région du lac Lady Evelyn, Ontario,

ainsi que 4 ajouts minéraux, soit:

1-Une fumée de silice condensée de la région de Bécancour, Québec,
2-Une cendre volante de la région de Lingan, Nouvelle-Ecosse
3-Une cendre volante de la région de Thunder Bay, Ontario, et,
4-Un laitier granulé de haut fourneau de la région de St.-Catherines, Ontario.

La présente étude reprend donc à partir de l'étude précédente. Plusieurs points déjà abordés antérieurement, notamment la partie concernant l'historique du granulat de Trois-Rivières et les 3 types de réaction alcalis-granulats, ne sont pas traités de nouveau mais, par contre, certains points sont abordés de nouveau mais de façon plus élaborée.

I.2- PRESENTATION DE L'ETUDE EFFECTUEE

La présente étude a pour but de déterminer les mécanismes qui agissent lorsqu'on utilise des ajouts minéraux pour réduire ou annuler les expansions dues aux réactions alcalis-granulats.

Il existe actuellement une quantité importante de travaux rapportant les résultats d'essais d'expansion concernant les réactions alcalis-granulats et également l'effet combiné de granulat réactifs

et d'ajouts minéraux. Cependant, le nombre de travaux de longue haleine couvrant à la fois l'aspect quantitatif des expansions dues aux réactions alcalis-granulats ainsi que la causalité de l'efficacité ou de la non-efficacité de certains ajouts minéraux pour les contrer demeurent restreint. Ceci peut s'expliquer par le fait que la priorité est d'abord accordée à démontrer les effets concrets et directement observables des ajouts minéraux sur les réactions alcalis-granulats, à savoir, que certains ajouts minéraux réduisent de façon sensible les expansions dues à ces réactions. Plusieurs études confirment donc cet effet bénéfique des ajouts minéraux. D'autre part, nous réalisons que beaucoup reste à faire afin d'établir les mécanismes par lesquels les ajouts minéraux agissent pour réduire les expansions dues aux réactions alcalis-granulats.

En effet, tandis que les essais d'expansion sur des prismes de béton permettent d'observer l'ensemble des résultats des effets des ajouts minéraux sur les réactions alcalis-granulats, d'autres expérimentations visant à expliquer les mécanismes de réduction de ces réactions n'explorent souvent qu'un seul aspect du problème à la fois. Par la suite, les chercheurs tentent de corréler un à un les résultats de leurs expériences et finalement, ils tentent de corréler l'ensemble de ces résultats aux résultats des essais d'expansion.

A première vue, ceci peut paraître laborieux, d'autant plus que le nombre de paramètres pouvant intervenir est assez élevé. Citons

d'abord les caractéristiques des mélanges, soit:

1-La composition chimique du ciment, incluant la teneur en alcalis,
2-La surface spécifique du ciment,
3-La composition chimique des ajouts minéraux, incluant leur teneur en alcalis,
4-La surface spécifique des ajouts minéraux,
5-Le pourcentage de remplacement,
6-La granulométrie et la nature des granulats,
7-Le rapport eau-ciment,
8-Le rapport ciment-granulat,
9-Le rapport sable-gros granulat,
10-etc.

Interviennent également le mode et le temps de malaxage, la température au moment du mélange et les caractéristiques de la cure appliquée aux échantillons (température, humidité). Finalement, les méthodes d'expérimentation elles-mêmes peuvent modifier les caractéristiques des bétons qu'on cherche à déterminer (ex.: L'essai de porosimétrie au mercure où les pressions appliquées brisent ou modifient le réseau capillaire du béton testé).

Après avoir pris conscience des difficultés qui surviennent lorsqu'on désire corréler des résultats d'expérimentations effectuées sur des échantillons de béton et des précautions à prendre dans

l'interprétation de ces résultats, nous avons tenté, par cette étude, de couvrir, via une gamme d'expérimentations, l'ensemble des paramètres à étudier afin de déterminer le rôle des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats. Au cours de nos travaux, nous avons tenté de réduire au minimum le nombre de variables dont il faut tenir compte dans l'interprétation de nos résultats. Quoiqu'il en soit, nous avons toujours conscience que les essais d'expansions, malgré leurs défauts, demeurent un des meilleurs outils d'évaluation des effets des ajouts minéraux sur les réactions alcalis-granulats.

I.3- LES HYPOTHESES DE TRAVAIL

Voici les hypothèses habituellement proposées afin d'expliquer la réduction des réactions alcalis-granulats par l'utilisation d'ajouts minéraux:

1) Effet de dilution des alcalis
2) Action pouzzolanique
   2.1) Emprisonnement des alcalis dans le C-S-H
   2.2) Le rapport C/S dans le C-S-H
   2.3) Le rôle du $Ca(OH)_2$
3) La perméabilité du béton versus la mobilité des ions

1) L'effet de dilution

L'hypothèse exprimée ici est celle de la dilution des alcalis totaux au sein d'un béton dans lequel on a remplacé une certaine partie du ciment par un ajout minéral. Il va de soi que si on incorpore à un mélange de béton quelconque un ajout minéral qui possède une teneur en alcalis moindre que celle du ciment utilisé, il se produit un effet direct de dilution des alcalis totaux du mélange. Inversement, si l'on additionne à un mélange de béton un ajout minéral qui possède une teneur en alcalis supérieure à celle du ciment utilisé, il se produit un effet direct de concentration des alcalis totaux dans le mélange. Prenons l'exemple suivant:

MELANGE A:

-300 kg DE CIMENT A 1.0% Na_2O équ.

-30 kg DE FUMEE DE SILICE CONDENSEE A 0.1% Na_2O équ.

-200 kg DE GRANULATS

-150 kg D'EAU

POIDS TOTAL DU MELANGE: 680 kg

Dans ce mélange, nous avons (1% X 300 kg) + (0.1% X 30 kg) = 3.03 kg de Na_2O équ. pour 680 kg de béton, soit 0.446% Na_2O équ. Pour un mélange similaire où nous aurions 330 kg de ciment et aucun additif minéral, nous aurions 1% X 330 kg = 3.30 kg de Na_2O équ. pour 680 kg de béton, soit 0.485% Na_2O équ.

On remarque que pour un niveau de remplacement du ciment par la fumée de silice condensée de l'ordre de 10%, l'effet de dilution obtenue au niveau des alcalis reste faible (8.1%), et ce malgré la très faible teneur en alcalis de cette fumée de silice condensée. Une dilution importante peut toutefois être obtenue avec un fort pourcentage de remplacement (35% et plus), comme c'est généralement le cas lors de l'utilisation de laitier de haut fourneau, à condition évidemment, que le laitier utilisé soit de faible teneur en alcalis.

2) L'action pouzzolanique

2.1) Emprisonnement des alcalis dans le C-S-H

En se combinant avec la portlandite ($Ca(OH)_2$) produite de façon normale lors de l'hydratation du ciment portland, les ajouts minéraux donnent lieu à la formation de silicate de calcium hydraté supplémentaire (C-S-H). Puisque le C-S-H possède une certaine capacité d'emprisonner des alcalis au sein de sa structure (le Na et le K remplacent une petite partie du Ca), d'avantage de C-S-H permet d'emprisonner ou d'incorporer une plus grande quantité d'alcalis par rapport à un mélange sans ajout, ce qui diminue la quantité d'alcalis disponibles pour réagir avec les granulats.

2.2) Le rapport C/S dans le C-S-H

Il est généralement admis que l'apport en SiO_2 des ajouts minéraux dans un mélange de béton donne lieu à la formation de silicates de calcium hydratés dont le rapport C/S est inférieur à celui de bétons sans ajout minéral. Ceci s'applique aux ajouts minéraux qui contiennent du SiO_2, ce qui est pratiquement toujours le cas. Un tel C-S-H avec un rapport C/S moindre peut incorporer d'avantage d'alcalis au niveau de sa structure, ce qui diminue la quantité d'alcalis disponibles pour réagir avec les granulats.

2.3) Le rôle du $Ca(OH)_2$

Il est possible que le $Ca(OH)_2$ soit impliqué dans la réaction entre les alcalis et les granulats. Le premier produit de réaction formés lors de la réaction alcalis-granulats est constitué d'alcalis et de silice. A ce stade, en l'absence de $Ca(OH)_2$, la petite quantité d'alcalis disponibles dans la solution interstitielle conduit à un épuisement des alcalis. Par contre, en présence de $Ca(OH)_2$, le Ca peut remplacer une partie des alcalis dans le gel d'alcalis-silice. Ceci permet une remise en circulation des alcalis qui peuvent ainsi aller réagir à nouveau ailleurs dans le béton. Mentionnons que des gels de silice analysés par l'auteur (Durand et Bérard, 1987) et qui provenaient de plusieurs échantillons contenant des granulats réactifs se sont toujours révélés calco-silico-alcalins, ce qui

confirme en quelque sorte le rôle possible du calcium dans les réactions alcalis-granulats.

Ainsi, les ajouts minéraux, en se combinant au $Ca(OH)_2$, empêchent celui-ci de recycler les alcalis responsables de l'attaque initiale des phases réactives des granulats.

Ces 3 hypothèses sont reprises au chapitre III où elles sont discutées plus en détail. Ce chapitre traite également des méthodes utilisées afin de vérifier ces hypothèses.

3) La perméabilité du béton versus la mobilité des ions

Cette hypothèse concerne la mobilité des ions alcalins au sein de la pâte de ciment hydraté. Dans une pâte où les ions alcalins sont peu mobiles, ces ions pendront plus de temps à atteindre les granulats et ainsi le taux de réaction peut être diminué de beaucoup.

Les ajouts minéraux, en se combinant au $Ca(OH)_2$ produit par l'hydratation du ciment portland, conduisent à la formation d'une pâte plus dense, plus riche en C-S-H donc potentiellement moins perméable. Il est donc possible que les ajouts minéraux réduisent les expansions dues aux réactions alcalis-granulats parce que les bétons qui les contiennent sont moins perméables, ou encore, parce que la mobilité des ions alcalins dans une pâte avec ajout est moindre que

celle d'une pâte ordinaire.

Cette hypothèse a d'ailleurs déjà été vérifiée avec des bétons contenant de la fumée de silice condensée. En effet, leur perméabilité à l'eau et aux ions chlore est nettement réduite en comparaison avec des bétons traditionnels (Feldman et Cheng-yi,1985).

I.4- EXPERIMENTATIONS

La partie expérimentale de cette étude comprend 2 phases. La première phase consiste en des essais d'expansion de prismes de béton de 75mm X 100mm X 300mm. Les détails concernant ces essais sont donnés à l'annexe A.

Mentionnons que nous avons utilisé 3 granulats réactifs, soit 2 calcaires siliceux et un schiste métamorphique chloriteux, ainsi que 2 ajouts minéraux, soit une fumée de silice condensée et un laitier granulé. A titre exploratoire, nous avons également utilisé d'autres ajouts, mais en combinaison avec un seul granulat. Les quantités d'ajout sont indiqués en pourcentage par rapport au poids de ciment dans les mélanges de contrôle, qui eux sont sans ajout. Les pourcentages de remplacement varient entre 0% et 15%.

La deuxième phase de l'étude consiste en des essais qui ont pour

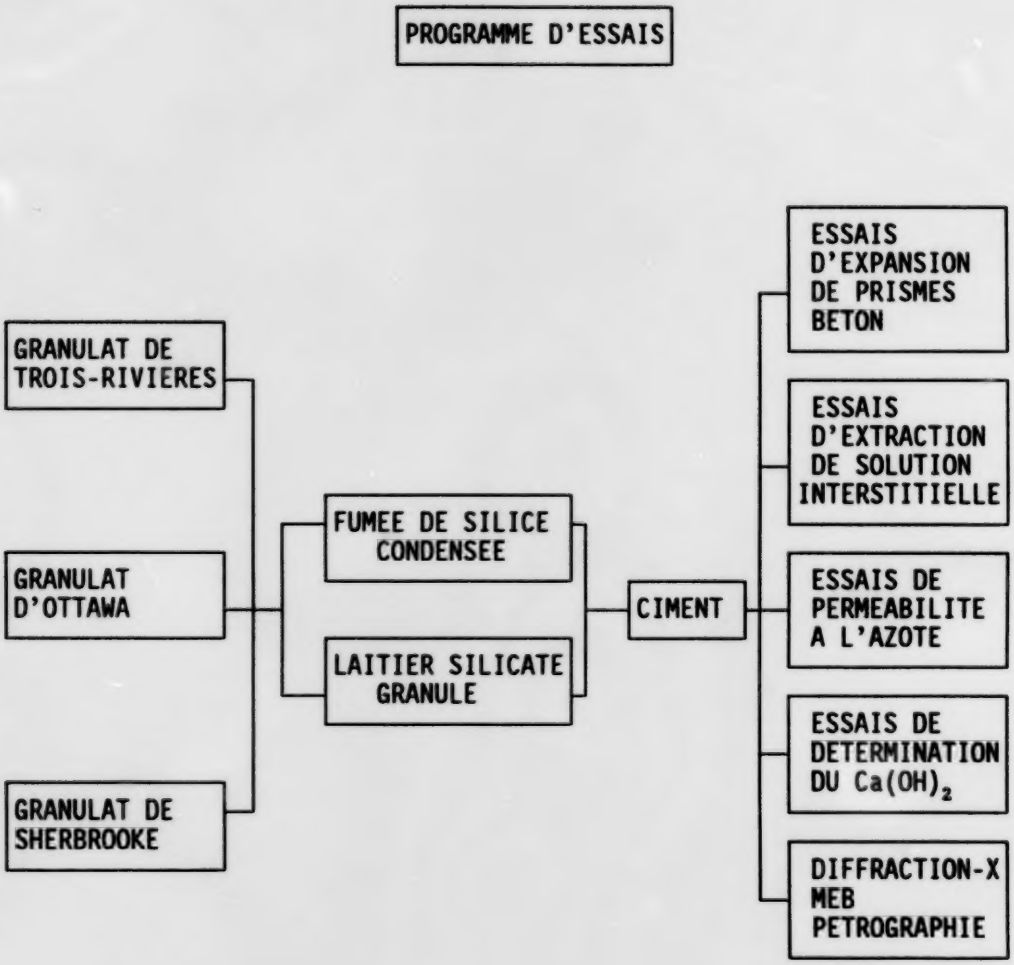


Fig. 1-Programme d'essais.

but de vérifier les diverses hypothèses citées précédemment. Parmi ces essais, citons l'extraction de la solution interstitielle, la détermination de la perméabilité, la détermination des teneurs en $Ca(OH)_2$, etc. Chacun des essais est décrit en annexe (modalité des essais et description de l'appareillage) tandis que les notions théoriques, l'argumentation et la revue de la littérature font l'objet des chapitres II à IV.

Afin d'être en mesure d'effectuer les meilleures corrélations possibles entre les essais d'expansion et les autres essais et afin d'être en mesure de réduire au minimum le nombre de variables dont il faut tenir compte, nous avons effectué les essais à l'aide d'échantillons possédant les mêmes caractéristiques de mélange. Nous avons également utilisé un ciment dont nous avions constitué une réserve suffisante pour l'ensemble des travaux. Il s'agit d'un lot de 400 kilogrammes de ciment portland type 10 que nous avons homogénéisé puis emmagasiné dans des sacs en plastique doublés et scellés convenablement.

Dans la mesure du possible, nous avons utilisé le même mode et temps de malaxage ainsi que les mêmes conditions d'entreposage. De plus, plusieurs échantillons devant servir pour différents essais ont été fabriqués à partir des mêmes gâchées.

CHAPITRE II

L'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

II.1- AVANT-PROPOS

Avant de tenter de définir le rôle des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats, il convient de s'attarder quelque peu sur la définition et la nature même des processus d'hydratation du ciment portland et ce en portant une attention particulière à la microphysico-chimie de la réaction eau-ciment portland. Ceci est nécessaire afin de pouvoir déterminer, par la suite, les effets des ajouts minéraux se produisant au même niveau, i.e., au point de vue microscopique. Nous savons que ce sont en fait des phénomènes microscopiques qui confèrent au béton ses propriétés macroscopiques et c'est de ce côté qu'il faut d'abord porter notre attention.

II.2- LE CIMENT PORTLAND

Le ciment portland est constitué d'un mélange de clinker et de gypse ($CaSO_4$) broyé à des surfaces spécifiques de l'ordre de 250-400

m^2/kg pour un ciment portland type 10 conventionnel. Le clinker est constitué de 4 phases principales soit le C_3S, le C_2S, le C_3A et le C_4AF.

En présence d'eau, le ciment portland réagit promptement. Les réactions impliquées étant exothermiques, un dégagement de chaleur important accompagne l'hydratation. En quelques heures, la prise initiale se manifeste et, généralement, le durcissement débute après une période de 5 à 6 heures. Un béton traditionnel, fait de ciment portland type 10, peut atteindre une résistance en compression de l'ordre de 20 à 30 MPa en 28 jours.

La majeure partie de l'hydratation du ciment portland se produit durant les 28 premiers jours suivant le gâchage du mélange mais celle-ci n'est pas terminée puisqu'on observe des accroissements de la résistance en compression de bétons pendant plusieurs années (Neville, 1983). On attribue généralement ce gain de résistance à long terme à l'hydratation lente et progressive du C_2S (25% du clinker).

II.3- LA CHIMIE DE L'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

Seligmann et Greening (1968) ont décrit l'hydratation du ciment portland de la façon suivante:

TABLEAU 1

LIMITES APPROXIMATIVES DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT PORTLAND

(d'après Neville, 1983, p. 11)

OXYDE	POURCENTAGE
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0.5-6.0
MgO	0.1-4.0
ALCALIS	0.2-1.3
SO_3	1-3

"Les réactions d'hydratation initiales peuvent être considérées comme étant essentiellement une séquence continue de situations d'équilibre de phases. Le contact entre le ciment et l'eau produit une série de réactions gouvernées par les concentrations locales des solutions à l'interface des particules de ciment et de l'eau pour produire des constituants tels des sulfo-aluminates de calcium hydratés et un hydrogrenat. Ces réactions locales sont suivies par une période d'hydratation lente au cours de laquelle la composition de la solution est relativement constante aussi longtemps que l'ettringite précipite et que la sursaturation en chaux persiste.

Quand la cristallisation de la portlandite débute, un gel de silicate de calcium hydraté contenant du sulfate et un peu d'alumine se forme. L'ettringite continue à se former jusqu'à ce que le gypse s'épuise; la concentration de la solution en sulfate chute. La dissolution rapide de l'ettringite et des phases aluminate et ferrite qui demeurent entraîne la formation d'un gel plus riche en alumine, i.e., le sulfo-ferro-aluminate calcique hydraté et la forme pauvre en sulfate (monosulfate "AFm") du sulfo-aluminate calcique hydraté. A ce stade la formation ultérieure d'un hydrogrenat de silice et d'alumine peut être due à des diminutions locales de la concentration en sulfate dans la phase liquide.

Les phases solides présentes au stade d'hydratation complète du système eau-ciment sont identifiées comme étant des gels de silicate de calcium hydraté (C-S-H) contenant des quantités appréciables d'alumine, de sulfate et d'alcalis. On retrouve également du monosulfo-aluminate de calcium hydraté, du monosulfo-ferro-aluminate de calcium hydraté, de l'hydrogrenat d'alumine-silice et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). L'ettringite et son analogue ferreux sont aussi présents dans le cas de ciments pauvres en C_3A mais le plus souvent, ils résultent d'une réaction de carbonatation."

Les équations suivantes représentent les réactions les plus importantes du processus d'hydratation du ciment portland: (Helmuth, 1987)

$$2C_3S + 6H \longrightarrow \underset{\text{GEL DE C-S-H}}{C_3S_2H_3} + 3CH \qquad (2.1)$$

$$2C_2S + 4H \longrightarrow \underset{\text{GEL DE C-S-H}}{C_3S_2H_3} + CH \qquad (2.2)$$

$$C_3A + 3\overline{C}S\overline{H}_2 + 26H \longrightarrow \underset{\text{ETTRINGITE (AFt)}}{C_3A(\overline{C}S)_3H_{32}} \qquad (2.3)$$

$$C_3A + \overline{C}S\overline{H}_2 + 10H \longrightarrow \underset{\substack{\text{MONO-SULFO-ALUMINATE DE CALCIUM}\\ \text{HYDRATE (AFm)}}}{C_3A\overline{C}S\overline{H}_{12}} \qquad (2.4)$$

$$C_3A + CH + 18H \longrightarrow \underset{\text{ALUMINATE DE CALCIUM HYDRATE}}{C_4AH_{19}} \qquad (2.5)$$

$$C_4AF + 2CH + 10H \text{ ---> } C_6AFH_{12} \qquad (2.6)$$

HYDROGRENAT

Les oxydes de calcium et de magnésium forment également des hydrates.

Les équations 2.5 et 2.6 sont des exemples de réactions qui se produisent s'il n'y a pas suffisamment de sulfate pour former du monosulfo-aluminate de calcium hydraté ou de l'ettringite (ou son analogue ferreux) comme dans les équations 2.3 et 2.4.

Il est important de noter que les réactions 2.5 et 2.6 consomment du CH directement et qu'elles sont donc en compétition directe avec la réaction pouzzolanique pour la chaux produite par la formation des silicates de calcium hydratés. De plus, les réactions 2.3 et 2.4 requièrent également du calcium et sont affectées par tout processus qui diminue la concentration du Ca dans la solution.

II.4- LA COMPOSITION DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE

Au tout début de l'hydratation, la phase liquide contient surtout les ions calcium, sulfate, sodium et potassium. Très peu de silicium (2 p.p.m., Thomas et Double, 1981), de fer, de magnésium et d'aluminium sont présents. La solution est nettement sursaturée par rapport au CH, plus spécialement juste avant le début de la

cristallisation. Les alcalis provenant des sulfates solubles du ciment affectent ces concentrations et la composition du liquide tend à être gouvernée par l'équilibre décrit par la réaction suivante: (Helmuth, 1987)

$$CaSO_4.2H_2O + 2MOH \longleftrightarrow M_2SO_4 + 2H_2O + Ca(OH)_2 \qquad (2.7)$$

SOLIDE AQU. AQU. SOLIDE

où M= Na, K, Li.

A des étapes plus avancées de l'hydratation de pâtes avec un faible rapport eau-ciment, la concentration en alcalis du liquide peut excéder 0.5N avec un pH correspondant supérieur à 13, et ce, même avec un ciment à basse teneur en alcalis. A de telles concentrations, une quantité importante d'alcalis peut être incorporée dans le C-S-H.

II.5- LA COMPOSITION DES PHASES SOLIDES DE LA PATE DURCIE

La composition du silicate de calcium s'éloigne quelque peu de la composition stoechiométrique donnée par les réactions 2.1 et 2.2 ($C_3S_2H_3$). Le rapport C/S donné par les réactions 2.1 et 2.2 pour le C-S-H est 1.5 alors qu'en réalité, celui-ci varie en moyenne entre des valeurs de 1.4 et 1.7 (Kantro et al., 1961). Copeland et al. (1967) ont aussi démontré que les silicates de calcium hydratés

réagissent avec les alumino-ferrites et les sulfates pour former des gels contenant des petites quantités d'aluminium, de fer, de magnésium et de soufre et que les rapports C/S des pâtes de ciment portland sont légèrement supérieurs à ceux des pâtes pures de C_3S.

Lachowski et al. (1980) rapportent un rapport C/S de pâtes de ciment portland âgées de 28 jours variant entre 1.27 et 2.11 pour une valeur moyenne de 2.0. Ils ont obtenu ces valeurs à partir de 156 analyses effectuées par microscopie électronique analytique (MEA). Les valeurs moyennes obtenues pour les rapports A/S, F/S et $\bar{S}$/S ont été respectivement de .09, .02 et .06. Ils ont également effectué des analyses du monosulfo-aluminate de calcium hydraté qui s'est révélé contenir pratiquement autant de silicium que de soufre et plus d'aluminium que prévu pour un AFm. Ils expliquent les différences de composition des particules de gel de C-S-H de même morphologie par le fait que l'équilibre chimique dans une pâte n'est atteinte qu'à l'échelle du micron. Finalement, les résultats ont démontré que pratiquement tout le soufre et 1/3 de l'aluminium se retrouvent dans le C-S-H. Le fer tend aussi à marquer une préférence pour le C-S-H plutôt que pour les AFm et AFt.

Ainsi, nous ne devons donc pas considérer les silicates de calcium hydratés comme des phases pures de composition fixe mais plutôt comme des phases impures principalement composées de calcium, de silicium et d'eau pouvant contenir des quantités non-négligeables

d'alcalis, de soufre, d'aluminium, de magnésium et de fer. Nous verrons plus tard comment une variation du rapport C/S moyen du C-S-H d'une pâte durcie peut correspondre à une variation de la composition de la solution interstitielle à l'échelle du micron.

II.6- LA STRUCTURE ET LA POROSITE DE LA PATE DURCIE

Le premier produit de réaction formé à partir des silicates de calcium du ciment portland est un gel de C-S-H qui englobe plus ou moins chacun des grains individuels de silicate de calcium (de Jong et al.,1967). A ce moment, tant et aussi longtemps que cette membrane reste intacte, le taux d'hydratation demeure lent et constant par rapport au tout début de l'hydratation. Le terme utilisé pour définir cette période d'hydratation lente est la période dormante (dormant period, Double et Hellawell, 1977). Sur un graphique du dégagement de chaleur en fonction du temps écoulé après le gâchage, cette période correspond à un creux qui suit une période initiale de dégagement important de chaleur correspondant à l'activité des sulfates et des aluminates. (Voir la figure 3)

Après un certain temps, le taux de chaleur dégagée augmente à nouveau. Ceci est dû au fait que la couche de gel de C-S-H englobant les silicates de calcium éclate littéralement sous l'influence de pressions osmotiques qui forcent la solution à pénétrer dans les

grains de silicate de calcium. L'éclatement de la couche de gel de C-S-H donne lieu à formation d'une seconde catégorie de C-S-H, soit des fibrilles. Il ne s'agit ni plus ni moins que de tubes de C-S-H ayant leur origine à la surface des grains de silicates de calcium. Plus tard, l'hydratation se poursuit, des liens chimiques se forment entre les grains de ciment et les nouveaux types de C-S-H (gel, fibrilles ou cristaux en plaquettes) remplissent progressivement les espaces entre les grains de ciment.

Diamond (1976) a proposé un système de classification pour décrire les 4 morphologies principales de C-S-H telles qu'observées au MEB à partir d'observations sur des pâtes pures de silicate de calcium et de pâtes de ciment.

Type I:Particules fibreuses

Type II:Réseau réticulaire (structure entrecroisée et en nid d'abeille)

Type III:Grains aplatis, irréguliers, typiquement de 0.3 um de diamètre.

Type IV:Produit interne, C-S-H formé à l'intérieur des espaces originels entre les particules de ciment.

Quoiqu'il en soit, le terme utilisé pour décrire l'ensemble des C-S-H est le gel de C-S-H, car l'ensemble des particules de C-S-H demeurent tout de même de très petite dimension (Neville, 1983).

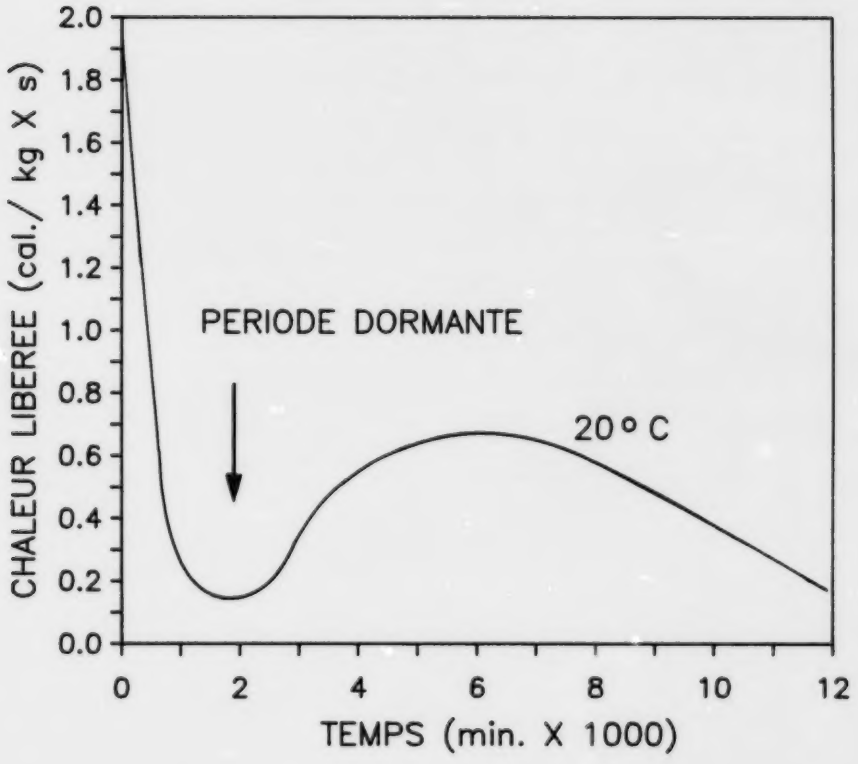


Fig. 2 -Graphique montrant la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment portland en fonction du temps écoulé depuis le gâchage. (Adapté d'après Neville, 1983)

Au point de vue porosité, le gel de C-S-H traditionnel se caractérise par environ 28% de pores d'un diamètre moyen de l'ordre de 15 à 20 Å et sa surface spécifique est de l'ordre de 200 000 m^2/kg.

Tout le processus d'hydratation du ciment portland donne donc lieu au développement d'une résistance mécanique élevée. La formation de gel, la croissance de fibrilles et de cristaux qui s'entrecroisent donne lieu à la formation de liens chimiques qui sont responsables d'une partie de cette résistance mécanique.

Ceci nous amène à traiter du rôle de l'eau. Comme nous venons de le constater, l'eau ne joue pas seulement un rôle de formation du C-S-H. L'eau fixée chimiquement est l'eau qui fait partie des hydrates de la pâte durcie. Cette eau constitue 23% de la masse du ciment anhydre qui s'est hydraté. Cette eau fait partie de l'eau dite non-évaporable. Dans une pâte durcie bien hydratée, l'eau non-évaporable ne représente jamais plus de 50% de l'eau totale présente (Neville, 1983).

Dans une pâte durcie, on distingue donc 2 catégories d'eau très importantes par rapport aux propriétés qu'elles confèrent à cette pâte, en particulier l'eau adsorbée, qui elle-même fait partie de l'eau dite évaporable. Aux endroits suffisamment rapprochés, i.e. au niveau des pores du gel de C-S-H, l'eau est adsorbée sur les surfaces

des différents type de C-S-H (liens attribuables aux forces de Van der Waals). La contribution de ces liens à la résistance et au comportement au séchage et au fluage de la pâte durcie de ciment portland est très importante (Beaudoin, 1982, Hannant, 1969, Powers, 1966, Ruetz, 1965, et Slate et Mayers, 1969).

L'eau évaporable comprend également l'eau libre qu'on retrouve au niveau des pores capillaires de la pâte durcie. Ces capillaires sont beaucoup plus grands que les pores du gel et leur volume n'est pas constant mais augmente en fonction du rapport eau-ciment et diminue en fonction du degré d'hydratation de la pâte. Les pores capillaires sont en fait les endroits où l'on retrouve l'eau qui n'est pas fixée chimiquement et ni logée dans les pores du gel. Typiquement, une pâte âgée d'un jour peut contenir 45% de pores capillaires. Après une période de 28 jours, cette valeur peut diminuer jusqu'à 2%.

L'eau qui est adsorbée possède des propriétés différentes de l'eau libre car les molécules d'eau adsorbée sont orientées par rapport aux surfaces où elles sont adsorbées. Ces molécules sont plus petites que les molécules d'eau libre, leur densité est légèrement supérieure et elles s'évaporent à des températures supérieures à celle de l'eau libre (au-dessus de 100 °C).

L'eau peut être adsorbé sur une épaisseur de 5 couches

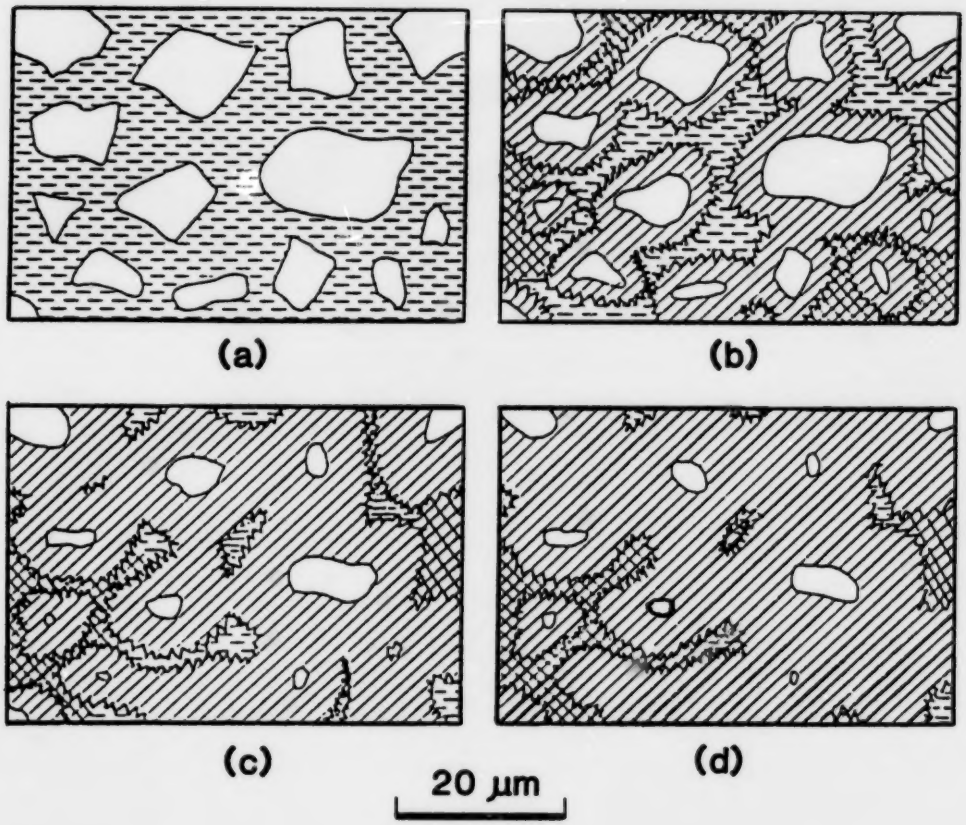


Fig. 3-Représentation schématique du processus d'hydratation du ciment portland. (Afin de simplifier le schéma, les sulfoaluminates de calcium sont inclus dans les C-S-H, mais, en réalité, ceux-ci cristallisent séparément et forment des phases distinctes) (D'après Mindess et Young, 1983, p. 95).

(a) mélange initial
(b) à 7 jours
(c) à 28 jours
(d) à 90 jours

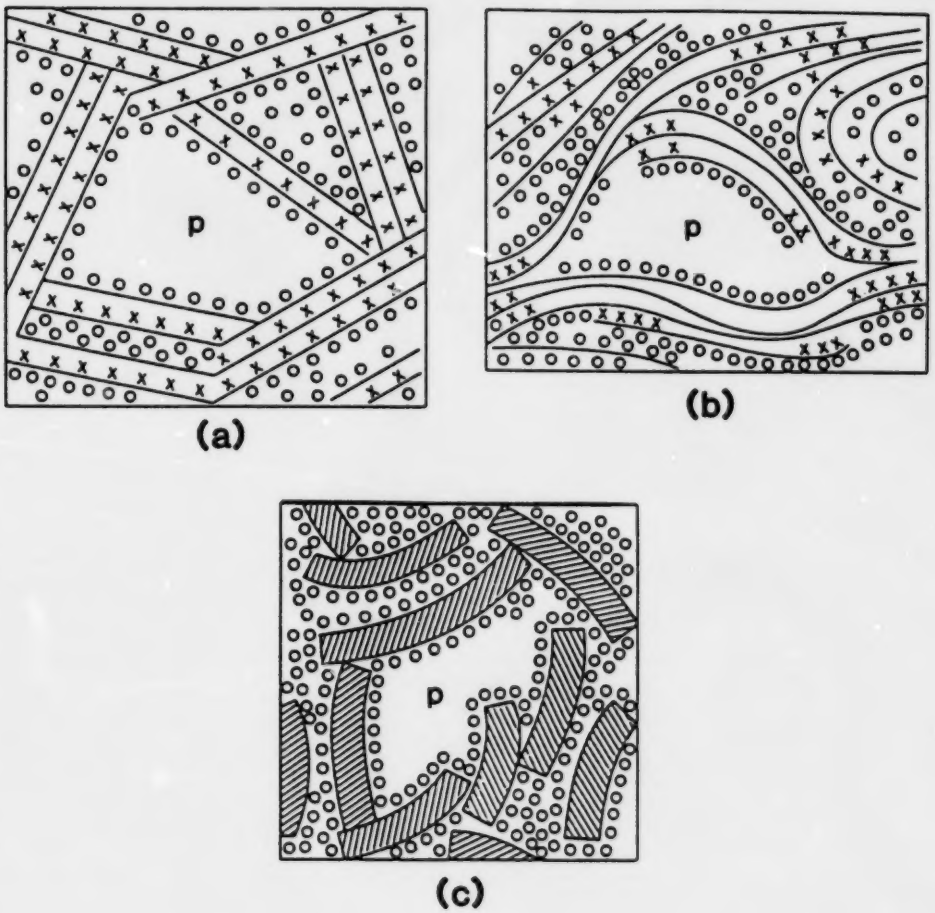


Fig. 4-Représentation schématique de différents modèles de C-S-H. (D'après Mindess et Young, 1983, p. 90, adapté de (a) Powers et Brunauer, 1958 et Brunauer, 1962; (b) Feldman et Serada, 1970; (c) Munich dans Wittmann, 1979.)

moléculaires. L'énergie de liaison des molécules d'eau adsorbée diminue de la première couche en allant vers les couches plus éloignées.

Ishai (1965) distingue 4 types d'eau évaporable:

1-L'eau des pores capillaires et des pores du gel située à une distance minimale de 20 Å de toute surface solide et donc en dehors de la zone active des forces de Van der Waals.

2-L'eau adsorbée à la surface des particules de gel en couche de 1 à 2 molécules d'épaisseur.

3-L'eau intercristalline, i.e., l'eau coincée entre 2 surfaces rapprochées de 2 cristaux à une distance d'environ 2 molécules (8 Å).

4-L'eau intracristalline zéolitique, i.e., une couche d'une molécule d'eau d'épaisseur (4 Å), qui joint 2 couches de cristallites de tobermorite, non-évaporable à température normale.

D'après cet auteur, la distinction de ces 4 types d'eau n'apparaît pas lorsqu'on trace un graphique de la quantité d'eau qui s'évapore en fonction de la température. Le phénomène est continu,

progressif, sans plateau qui permettrait de distinguer à quel type d'eau correspond telle énergie de liaison.

Sierra (1980) distingue 4 catégories d'eau: l'eau libre, l'eau adsorbée et l'eau combinée, soit moléculaire ou soit hydroxylique. L'auteur signale que la spectroscopie moléculaire est bien adaptée à l'étude de l'eau adsorbée tandis que la spectrométrie infrarouge permet de bien distinguer l'eau hydroxylique de l'eau moléculaire. La méthode de résonance magnétique nucléaire est aussi utilisée par l'auteur pour caractériser l'eau non-combinée. Ces méthodes sont utilisées en parallèle avec les analyses thermogravimétriques qui fournissent ainsi des informations supplémentaires sur la caractérisation de l'eau.

Sabri et Illiston (1980) mentionnent par ailleurs que la thermogravimétrie semi-isotherme et l'analyse thermique différentielle leur ont permis d'établir que l'eau évaporable dans les pâtes de ciment durcies n'est pas uniquement l'eau libre et l'eau adsorbée mais comprend aussi une partie d'eau de combinaison des hydrates, et ce, sous 105 °C.

II.7- RESUME DU CHAPITRE

Brièvement et en simplifiant les processus, nous pouvons résumer l'hydratation du ciment portland de la façon suivante:

1-Le ciment portland type 10 est une fine poudre (250-400 m^2/kg) constituée principalement de C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF et de gypse.

2-En présence d'eau, le gypse réagit rapidement avec les aluminates pour former des AFm et des AFt. Le liquide est à ce moment sursaturé par rapport au Ca et au S. Le liquide contient également de faibles quantités d'ions Si^{4+}, Al^{3+}, Mg^{2+} et Fe^{3+}. La concentration en alcalis peut facilement atteindre 0.5N et le pH du liquide se situe au-dessus de 13.

3-Un peu plus tard, le $Ca(OH)_2$ commence à précipiter sous forme de cristaux de 1 um ou plus. Il constituera environ 20% de la pâte durcie.

4-Le C-S-H commence à se former. Il y a plusieurs catégories morphologiques de C-S-H que l'on les regroupe sous la dénomination "gel de C-S-H". Ce gel contient un minimum de 28% de vide et sa surface spécifique est de l'ordre de 200 000 m^2/kg. Le gel de C-S-H peut continuer à se former longtemps après le gâchage des mélanges comme le témoigne l'augmentation continue de la résistance mécanique des bétons sur des périodes

s'étendant sur plusieurs années. La création de liens chimiques dus à la formation du C-S-H est responsable d'une partie de la résistance mécanique de la pâte durcie. L'autre partie de la résistance mécanique de la pâte est attribuable aux liens dus aux forces de Van der Waals entre le gel de C-S-H et l'eau adsorbée à sa surface au niveau des pores du même gel.

5-Une partie de l'eau est fixée chimiquement au niveau des phases hydratées de la pâte durcie. Une partie de l'eau du mélange est adsorbée à la surface des pores du gel. Une partie de l'eau est présente au niveau des pores capillaires. Le volume total des pores capillaires augmente en fonction du rapport eau-ciment. La dimension des pores capillaires varie d'une centaine d'angstroems à quelques microns. Leur volume total au début de l'hydratation peut atteindre 45% de la pâte. Ce volume diminue progressivement au fur et à mesure que le C-S-H se forme et envahit les pores capillaires. Dans une pâte de ciment bien hydratée, l'eau fixée chimiquement ne représente pas plus de 50% de l'eau totale présente. Ainsi, au-dessous d'un certain pourcentage d'eau non-liée chimiquement, l'hydratation cesse. Pour un échantillon scellé, le rapport E/C minimal pour que tout le ciment s'hydrate est théoriquement de 0.38. (Neville, 1983)

L'importance de la mise au point faite au cours de ce chapitre

réside dans le fait que les hypothèses utilisées pour expliquer le rôle des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats réfèrent directement à la nature intrinsèque de la pâte durcie de ciment portland, à savoir, la composition chimique des phases solides présentes et la composition chimique de la solution logée dans les pores.

En effet, nous avons situé ce rôle possible à au moins 2 niveaux principaux:

1-La modification de la composition des phases hydratées (selon le rapport C/S et la teneur en alcalis).

2-La modification de la composition de la solution interstitielle (selon la teneur en alcalis).

Ce dernier aspect est particulièrement important puisque les réactions alcalis-granulats sont des réactions du type liquide-solide.

CHAPITRE III

L'INFLUENCE DES AJOUTS MINERAUX SUR LA COMPOSITION DE LA PATE DURCIE

III.1- L'INFLUENCE SUR LA COMPOSITION DES PHASES SOLIDES

III.1.1- REVUE DES HYPOTHESES

Au chapitre I, nous avons proposé l'hypothèse voulant que l'addition d'ajouts minéraux à une pâte de ciment portland modifie en quelque sorte la composition chimique du C-S-H par rapport à une pâte de ciment portland pure. Notre intérêt porte, d'une part, sur la diminution du rapport C/S global du C-S-H et l'augmentation de la quantité de C-S-H d'une telle pâte et, d'autre part, sur la plus grande capacité du C-S-H à emprisonner ou à incorporer des alcalis (Na, K) lorsque le rapport C/S est moindre. Si cette hypothèse est juste, il y aura moins d'alcalis disponibles pour réagir avec les granulats.

III.1.1.1- L'EMPRISONNEMENT DES ALCALIS DANS LE C-S-H

Dans le ciment portland, les alcalis se concentrent dans 3 types de composés. Ils sont sous forme de sulfates de sodium et de potassium en substitution dans les aluminates et ferro-aluminates de calcium (Older et Wonnemann, 1983[1]), et en substitution dans les silicates de calcium (Politt et Brown, 1964, Osbaeck et Jons, 1980, Jawed et Skalny, 1977 et Older et Wonnemann,1983[2]).

Les alcalis les plus facilement disponibles proviennent des sulfates de sodium et de potassium (Na_2SO_4 et K_2SO_4). Le sulfate de potassium peut réagir avec le gypse pour former la syngénite ($K_2SO_4, CaSO_4 \cdot H_2O$) durant l'entreposage du ciment. Le sodium tend à se retrouver sous forme de sulfates à 2 alcalis plutôt que sous forme de sulfate d'alcali simple. En général, le rapport Na/K dans les sulfates vaut la moitié de celui du clinker (Pollitt et Brown, 1964).

La deuxième source d'alcalis dans le clinker est le C_3A et le C_4AF (Shin et Glasser, 1983 et Regourd et al., 1981); ceux-ci libèrent des alcalis au fur et à mesure qu'ils s'hydratent.

Les alcalis contenus dans les silicates de calcium sont les moins disponibles. La capacité à retenir des alcalis est inversement proportionnelle à leur teneur en calcium, i.e., à leur rapport C/S (Bhatty, 1985).

Lors de l'hydratation du ciment portland, les alcalis se répartissent dans les phases hydratées et dans la solution interstitielle des pores capillaires. Une partie des alcalis demeure emprisonnée au sein des particules de ciment non-hydratées.

A partir de ceci, il est possible de supposer que tout ce qui peut provoquer une baisse de la quantité d'alcalis disponibles pour réagir avec les granulats permettra une diminution des expansions dues aux réactions alcalis-granulats, ou du moins, permettra une diminution du taux d'expansion.

Les ajouts minéraux, par leur action pouzzolanique, se combinent avec la portlandite ($Ca(OH)_2$) produite de façon normale lors de l'hydratation du ciment portland et donnent lieu à la formation de C-S-H supplémentaire. Puisque le C-S-H possède la capacité d'incorporer une certaine quantité d'alcalis dans sa structure (le Na et le K remplacent le Ca), l'accroissement de la quantité de C-S-H permet de réduire la quantité d'alcalis disponibles pour réagir avec les granulats.

III.1.1.2- LE RAPPORT C/S DANS LE C-S-H

L'apport en Si des ajouts minéraux donne lieu à la formation de C-S-H ayant un rapport C/S moindre que celui du C-S-H d'une pâte de ciment portland pure. Puisque la capacité du C-S-H à incorporer des alcalis est inversement proportionnelle à leur rapport C/S (Bhatty, 1985), une diminution du rapport C/S produite par l'apport de Si par les ajouts minéraux permet, encore une fois, de réduire la quantité d'alcalis disponibles pour réagir avec les granulats.

Rayment (1982) rapporte les résultats d'une étude sur l'effet de cendres volantes sur les rapport C/S et la teneur en alcalis du C-S-H de pâtes de ciment durcie. L'étude démontre que le rapport C/S du C-S-H d'une pâte où 20% du ciment a été remplacé par des cendres volantes est passé d'une valeur moyenne de 1.71 à 1.55 à 8 jours (42 analyses). De plus, il rapporte que 0.18% de plus de potassium a été trouvé dans les pâtes avec cendres volantes pour une valeur moyenne de 0.76%. Ceci est en accord avec une étude de Bhatty et Greening (1978) sur les réactions entre les silicates de calcium et les alcalis. Ils confirment encore une fois la plus grande capacité du C-S-H à fixer les alcalis lorsque son rapport C/S est moindre.

III.1.1.3- LE ROLE DU $Ca(OH)_2$

Il est possible que le $Ca(OH)_2$ participe à la réaction entre les alcalis et les granulats. Lors de cette réaction, le premier produit de réaction est un gel d'alcalis-silice mais, par la suite, du calcium s'ajoute et il remplace une partie des alcalis. En l'absence de calcium, il est possible de supposer que la quantité d'alcalis disponibles diminue rapidement et que la réaction cesse. Le calcium permet donc une remise en circulation des alcalis pour ainsi promouvoir la réaction à un stade plus avancé et plus étendu.

Durand et Bérard (1987) rapportent que le gel calco-silico-alcalin trouvé dans des bétons contenant des granulats réactifs contient toujours une quantité importante de calcium. Dans le cas des calcaires siliceux, environ 15% de calcium est présent dans le gel produit par la réaction alcalis-silice. Il est fort possible que le calcium présent dans les gels calco-silico-alcalins ait comme source le $Ca(OH)_2$ (Glasser et Kataoka, 1982). Le calcium ne passerait pas directement de la portlandite au gel mais serait d'abord dissout dans la solution interstitielle.

Chatterji (1979), Min-shu et Su-fen (1980) et Ming-shu et al. (1983) signalent une autre possibilité quant au rôle du $Ca(OH)_2$ dans les réactions alcalis-granulats, i.e., le $Ca(OH)_2$ réagirait avec le C-S-H pour produire du C-S-H plus riche en calcium, ce qui,

indirectement, provoquerait la libération d'une certaine quantité d'alcalis. Ces alcalis seraient donc remis en circulation un certain temps après le début de l'hydratation et pourraient réagir avec les granulats.

A partir de ceci, nous croyons que la diminution de la quantité de $Ca(OH)_2$ par l'action pouzzolanique des ajouts minéraux est probablement un facteur important à considérer dans l'étude des effets des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats.

III.1.2- LES METHODES DE MESURE DU RAPPORT C/S

Au chapitre précédent, nous avons mentionné que l'hydratation du ciment portland donne lieu à la formation de C-S-H et que le rapport C/S du C-S-H n'est pas fixe mais varie entre 2 extrêmes.

Les techniques modernes rendent possibles l'analyse du C-S-H, notamment les appareils produisant de minces faisceaux d'électrons d'énergie contrôlée. Il s'agit de la microsonde électronique (MEA), du microscope électronique à balayage (MEB) et du microscope électronique à transmission (MET). Ces 3 types d'appareils sont généralement munis d'un système de détection des rayons X à dispersion d'énergies (spectromètre à dispersion d'énergie, SDE) ou encore à sélection de longueurs d'onde (spectromètre à sélection de longueur d'onde, SSLO).

Ce dernier type de détecteur, quoique moins utilisé, permet des analyses plus précises. Dans les paragraphes qui vont suivre, nous rapportons quelques résultats obtenus par différents chercheurs concernant la détermination du rapport C/S d'échantillons de silicates de calcium et de pâtes de ciment portland.

Des mesures effectuées par Rayment et Majumdar (1981) à l'aide d'une microsonde électronique sur des pâtes de C_3S hydratées ont donné des valeurs variant entre 1.44 + 0.08 et 1.62 + 0.06 pour des grains de C-S-H qui démontraient une morphologie semblable. Les travaux effectués par ces auteurs ont d'ailleurs démontré l'influence importante des conditions expérimentales sur les résultats obtenus. Par exemple, ils mentionnent que le rapport C/S obtenu varie en fonction du voltage utilisé. Les volumes de pâte analysés augmentant en fonction de l'énergie du faisceau d'électrons, il est donc normal d'observer des différences dans les rapports C/S à l'intérieur d'une même pâte.

Afin de tenir compte du fait que les rapports C/S d'une même pâte varient d'un site d'analyse à un autre, et ce, même si l'on utilise un seul niveau d'énergie pour les analyses, Chattergi et Thaulow (1980) ont proposé une approche statistique à l'analyse des particules dans les pâtes de ciment. Cette méthode permet d'obtenir des rapports C/S moyens qu'on peut, par la suite, comparer à des rapports provenant d'autres échantillons.

Gard et al. (1977) donnent des rapports C/S moyens pour des pâtes pures de C_3S de l'ordre de 1.52 à 1.61, l'intervalle de valeurs variant entre 1.21 et 1.96. Ils comparent d'ailleurs les différents avantages et désavantages d'utiliser la microsonde électronique (MEA), le microscope électronique à balayage équipé d'un détecteur de rayons X (MEB + SDE), la spectromètre électronique et le microscope électronique à transmission équipé d'un détecteur de rayons X (MET + SDE ou SSLO). Ce dernier possède l'avantage de pouvoir fournir une analyse provenant d'un très petit volume de pâte (30 nm de diamètre pour des matériaux calco-silicatés). De plus, un patron de diffraction peut être obtenu si la zone analysée contient une phase cristalline (ex.: du $Ca(OH)_2$)(Rayment et Lachowski, 1984). Le principal désavantage du MET réside dans la difficulté et l'effort à fournir pour préparer des échantillons extrêmement minces.

Lachowski et al. (1980) ont obtenu des valeurs de rapports C/S à partir de pâte de silicates de calcium variant entre 1.4 et 1.7. Sur des pâtes de ciment portland, Lachowski et al. (1980) ont obtenu des rapports C/S variant entre 1.27 et 2.11. La moyenne des 408 analyses effectuées est de 2.00.

Taylor et Newbury (1984) rapportent les résultats d'analyses effectuées à l'aide d'une microsonde sur des pâtes de C_3S et de C_2S âgées de 23 ans. Les rapports C/S moyens obtenus pour les pâtes de C_3S et de C_2S ont été respectivement de 1.72 et 1.78. Ils mentionnent que

leurs valeurs sont au-dessus du 1.5 théorique pour du gel de C-S-H pur de composition stoechiométrique $C_{1.5}SH_{1.5}$. En fait, étant donné le grand volume analysé par le faisceau, ils croient qu'une contamination en Ca peut se produire étant donné l'omniprésence de $Ca(OH)_2$ dans la pâte.

Enfin, si l'on compare les résultats provenant des pâtes de silicates de calcium purs à ceux provenant de pâtes de ciment portland, les rapports C/S obtenus sur des pâtes pures de C_3S sont légèrement inférieurs à ceux obtenus sur des pâtes de ciment portland (Copeland et al., 1967).

A partir de ces données, nous pouvons constater qu'il est possible de mesurer un rapport C/S moyen dans une pâte de C-S-H mais que les appareils, tels la microsonde et le MEB, ne discerne pas assurément les zones avec ou sans contaminant. À ce point de vue, il semble que le MET possède l'avantage de pouvoir analyser une zone très restreinte de matériel, et, de plus, il permet de discriminer les zones où des contaminants cristallins sont présents, notamment du $Ca(OH)_2$.

III.2- L'INFLUENCE DES AJOUTS SUR LA COMPOSITION DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE

III.2.1- LA SOLUTION INTERSTITIELLE

Au chapitre II, nous avons mentionné que l'eau présente initialement dans une pâte n'est jamais totalement fixée chimiquement par l'hydratation du ciment portland et qu'une partie demeure dans les pores du gel et dans les pores capillaires. Nous avons également mentionné que cette eau non liée chimiquement n'est pas pure puisqu'elle contient des ions Ca^{2+}, Si^{4+}, Al^{3+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}, S^{6+}, Na^{+}, K^{+} et OH^{-}. En ce qui concerne cette étude, les ions les plus importants sont évidemment les ions Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+} et OH^{-}. Le terme que nous utiliserons concernant cette solution sera "solution interstitielle".

Un corollaire aux hypothèses proposées précédemment concernant l'augmentation de la quantité d'alcalis retenus dans le C-S-H est la diminution de la quantité d'alcalis présents dans la solution interstitielle. En effet, si le C-S-H des pâtes avec ajout minéral incorpore plus d'alcalis que le C-S-H des pâtes sans ajout (dû au fait qu'il est plus abondant et a un rapport C/S plus faible que dans les pâtes sans ajout), une diminution de la concentration en alcalis dans la solution interstitielle devrait se produire automatiquement. Moins d'alcalis dans la solution interstitielle signifie une diminution de la réaction alcalis-granulats.

III.2.2- LES METHODES D'EXTRACTION ET D'ANALYSE DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE

Longuet et al. (1973) furent les premiers à décrire et à utiliser un appareil pour extraire la solution interstitielle de la pâte de ciment hydratée. Barneyback et Diamond (1981) décrivent de façon détaillée un appareil d'extraction ainsi que les techniques d'analyse de la solution interstitielle. En gros, l'appareil consiste en un cylindre disposant d'une base amovible et d'un piston q'on introduit par le haut du cylindre et auquel on applique une charge importante à l'aide d'une presse hydraulique. Cette charge est de l'ordre de 350 kN, ce qui correspond à une pression appliquée sur l'échantillon de l'ordre de 135 MPa (19 197 lb/po.^{2}). Un drain traverse la base et rejoint la partie interne du cylindre. Le tout est en acier haute résistance (SAE 4340).

Le liquide extrait est récupéré à l'aide d'une seringue et les volumes de liquide recueillis sont de l'ordre quelques millilitres. Les alcalis dans la solution sont par la suite analysés par photométrie à la flamme* et les teneurs en Si, Ca, Fe, Al et Mg sont mesurées par spectroscopie d'absorption atomique à la flamme. La teneur en sulfate est déterminée par une précipitation de $BaSO_4$ dans une solution contenant du $BaCl_2$ en excès; le barium résiduel est

* Les alcalis sont maintenant analysés par spectroscopie d'absorption atomique à la flamme.

par la suite mesuré par spectroscopie d'absorption atomique à la flamme. Le pH, qui peut atteindre des valeurs aussi élevées que 13-13.5, est mesuré par titrage au HCl.

Lambert et al. (1985) ont également utilisé cette méthode pour étudier la chimie de la solution interstitielle dans le système C_3S-NaCl-H_2O. Diamond (1981) a utilisé le même appareil que décrit précédemment pour vérifier l'effet de 2 cendres volantes sur la teneur en alcalis de pâtes. Les effets notés dans ce cas ont été à peu près nuls.

Lambert et al. (1985) ont effectué des essais d'extraction de solution interstitielle afin de vérifier la capacité de différents ciments à retirer les ions Cl^- de la solution interstitielle en rapport à la corrosion des aciers d'armature. Dans le même ordre d'idées, Byfors et al. (1986) ont déterminé la capacité de cendres volantes et de la fumée de silice à fixer les ions Cl^-, ceci, encore une fois, en rapport avec la corrosion des aciers d'armature.

Côté (1987) a effectué des extractions de solution interstitielle sur des pâtes avec ou sans fumée de silice et les résultats obtenus ont démontré une forte baisse de la teneur en alcalis dans la solution extraite des pâtes avec fumée de silice. Les échantillons étaient âgés de 0 à 21 jours et le pourcentage de remplacement du ciment par la fumée de silice était de 10%. L'appareil et les méthodes d'analyse

utilisés sont décrits à l'annexe B. Dans le cadre de cette étude, d'avantage d'essais ont été effectués et les résultats sont donnés au chapitre VI.

L'avantage de travailler au niveau de la solution interstitielle par rapport au niveau de la composition du C-S-H réside dans la rapidité et la simplicité de la méthode d'extraction. En effet, extraire et analyser la solution interstitielle d'un échantillon de pâte requiert environ 1 heure de travail tandis que l'analyse d'une cinquantaine de particules de C-S-H peut signifier beaucoup d'heures de travail à l'aide d'un appareil dont le coût d'utilisation est généralement élevé.

CHAPITRE IV

LA POROSITE ET LA PERMEABILITE

IV.1- LA POROSITE DUE AUX PHASES SOLIDES

Au chapitre II, nous avons décrit le processus d'hydratation du ciment portland. Ce processus comprend plusieurs étapes qui mènent à la formation de plusieurs catégories de C-S-H regroupées sous le terme "gel de C-S-H". Une pâte de ciment bien hydratée comprend des grains de ciment partiellement hydratés (10-15% de façon normale) entourés de fibrilles, des cristaux plats, du gel semi-amorphe et amorphe, de la portlandite (20%), des sulfo-aluminates calciques (cristaux ou autres formes), de l'eau non-fixée chimiquement et des pores. Les liaisons chimiques qui se créent sont responsables d'une partie de la résistance mécanique de la pâte durcie. Ce processus d'hydratation se produit rapidement au cours des quelques heures et des quelques jours suivant le gâchage et il peut se poursuivre très longtemps, i.e., plusieurs années. Le gain de résistance à long terme observé est attribué à l'hydratation lente et tardive du C_2S. Le gel de C-S-H peut former jusqu'à 50% de la pâte de ciment durcie, possède une porosité intrinsèque de l'ordre de 28% (pores de 15-20 Å) et une surface spécifique de l'ordre de 200 000 m^2/kg.

IV.2- LA POROSITE CAPILLAIRE

Au chapitre II, nous avons également décrit l'origine de la porosité capillaire. Celle-ci est due à l'excès d'eau qui n'est pas utilisée par la formation des hydrates de la pâte. Dans une pâte de ciment bien hydratée, l'eau fixée chimiquement ne dépasse pas 50% de l'eau totale présente (Neville, 1983). L'excès d'eau crée une certaine porosité dite capillaire dont le volume total augmente en fonction du rapport eau/ciment initial. De plus, celle-ci diminue au fur et à mesure que l'hydratation progresse et que du nouveau gel de C-S-H remplit une partie des pores capillaires. La dimension des pores capillaires varie d'une centaine d'angstroems (10^{-8} m) à quelques microns (10^{-6} m) (Metha, 1986).

Dans le cas de pâtes contenant des ajouts minéraux pouzzolaniques, la formation de C-S-H supplémentaire à partir du $Ca(OH)_2$ produit par l'hydratation du C_3S et du C_2S contribue à réduire cette porosité. Takemoto et Uchikawa (1980) ont comparé la porosité de pâtes de ciment avec un rapport eau-ciment de 0.3 avec des pâtes contenant 40% de cendres volantes. Le tableau 2 montre les résultats qu'ils ont obtenus sur des échantillons âgés de 0 à 180 jours. On remarque que les pâtes contenant des cendres volantes démontrent à 180 jours une porosité totale plus élevée que celle des pâtes pures, soit 24% comparativement à 20%. On remarque également que, dans les deux cas, la porosité capillaire diminue en fonction du

TABLEAU 2

POROSITE DE PATES PURES DE CIMENT ET DE PATES CONTENANT 40% DE CENDRES VOLANTES A DIFFERENTS TEMPS DE CURE

(d'après Helmuth, 1987, p. 119)

TEMPS DE CURE (JOURS)	POROSITE DE PATES PURES			POROSITE DE PATES AVEC 40% DE C.V.		
	GEL	CAPILLAIRE	TOTALE	GEL	CAPILLAIRE	TOTALE
0	0	0.48	0.48	0	0.44	0.44
1	-	-	0.40	-	-	0.35
3	0.134	0.15	0.28	0.113	0.20	0.32
91	0.150	-	-	0.201	-	-
180	0.180	0.02	0.20	0.20	0.04	0.24

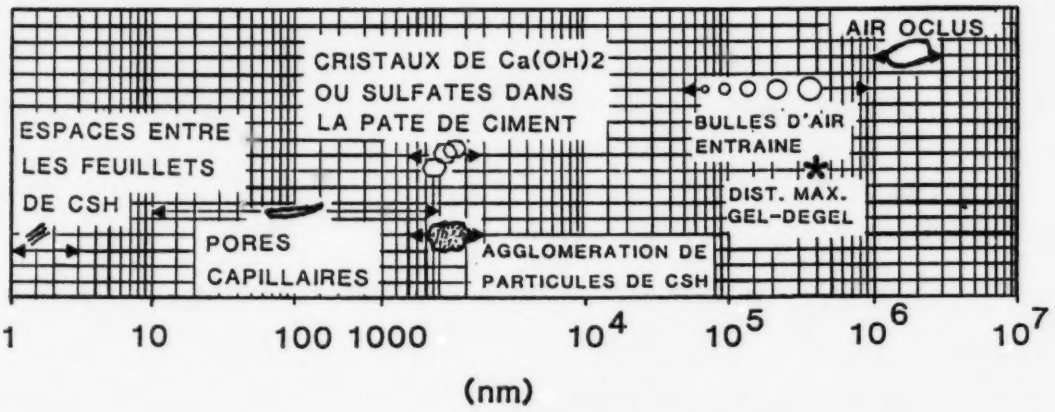


Fig. 5-Différentes classes dimensionnelles des solides et des pores dans une pâte de ciment hydraté. (D'après Metha, 1986)

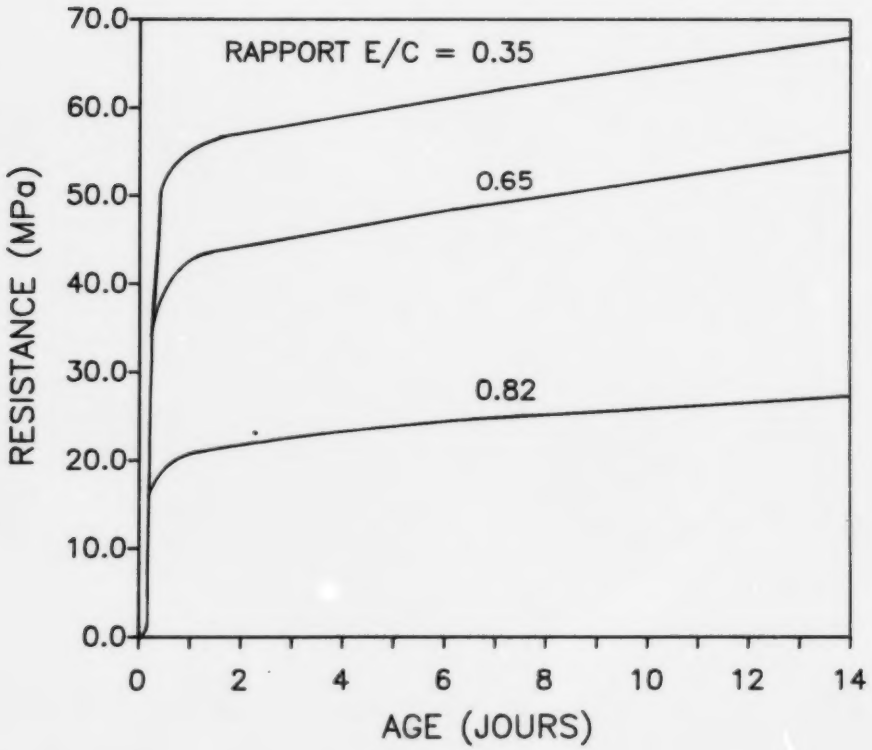


Fig. 6-Développement de la résistance de cylindres de béton avec différents rapports eau-ciment. (Béton fait de ciment alumineux, cure à 18 °C, 95% d'humidité relative) (D'après Neville, 1983, p. 92)

temps, tandis que la porosité attribuable au gel augmente en fonction du temps. Ceci correspond à une augmentation de la quantité de gel au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit et non pas à une augmentation de la porosité du gel lui-même puisque celui-ci possède une porosité caractéristique de 28%.

IV.3- L'HYPOTHESE DE L'INFLUENCE DE LA PERMEABILITE SUR LES REACTIONS ALCALIS-GRANULATS

Notre intérêt porte sur l'évaluation de l'influence des ajouts minéraux sur la porosité et la perméabilité car une de nos hypothèses initiales concernant le rôle des ajouts minéraux est qu'une diminution de la perméabilité dans un béton peut correspondre à une diminution de la mobilité des ions de la solution interstitielle (Bakker, 1979 et Bakker, 1981). A la limite, la solution interstitielle pourrait même être emprisonnée dans un réseau de pores non-communicants ou discontinus (Feldman et Cheng-yi, 1985[1]), ce qui réduirait de beaucoup l'accès des alcalis aux granulats du béton. Feldman et Cheng-yi (1985[2]) rapportent que l'addition au ciment de fumée de silice condensée provoque une diminution de la porosité totale et une diminution de la quantité d'eau évaporable et, par conséquent, augmente la résistance de tels mélanges aux attaques chimiques.

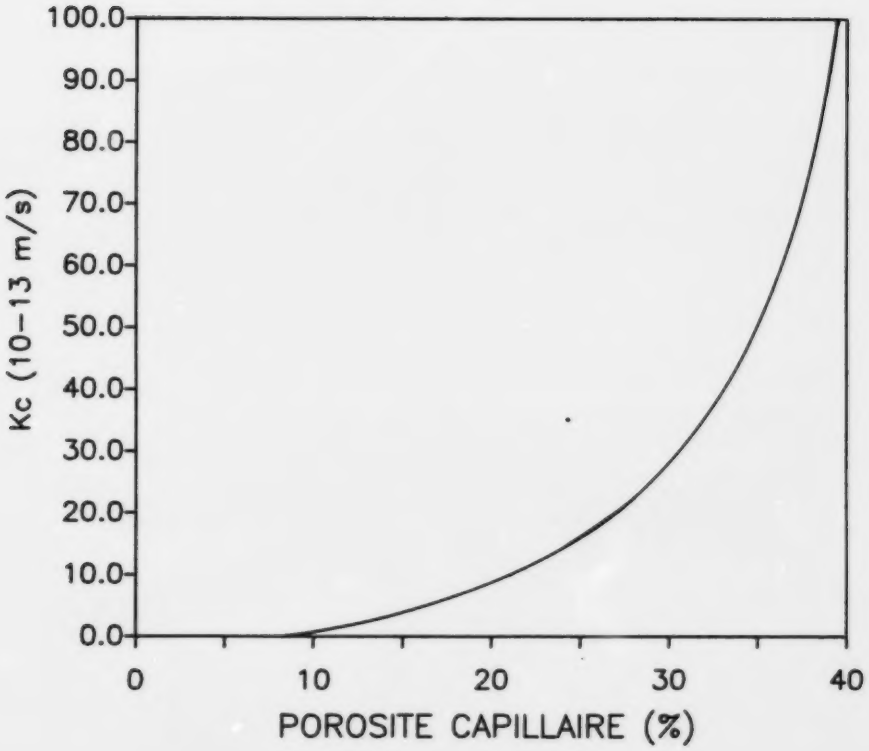


Fig. 7-Relation entre la perméabilité et la porosité capillaire de pâtes de ciment. (D'après Neville, 1983, p. 436)

Il est généralement admis que l'addition de fumée de silice condensée à des mélanges de béton réduit de beaucoup la perméabilité à l'eau de ces bétons par rapport à des bétons conventionnels. Bisaillon (1986, com. pers.) signale qu'il est même très difficile d'obtenir des valeurs de perméabilité à l'eau sur de tels bétons tellement celle-ci est faible. Dans les sections qui vont suivre, nous allons définir les méthodes utilisées pour mesurer et caractériser la porosité et la microstructure des pâtes de ciment durcies.

Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser un perméamètre à azote pour comparer la perméabilité relative de nos échantillons avec ou sans ajout minéral. Nous avons choisi cette technique pour sa simplicité, sa fiabilité et la rapidité avec laquelle elle permet d'obtenir des résultats. L'appareil ainsi que le mode opératoire sont décrits à l'annexe C.

IV.4- LES METHODES DE MESURE DE LA POROSITE

IV.4.1- LA POROSITE TOTALE MESUREE PAR SECHAGE

Une méthode simple pour mesurer la porosité totale de pâtes, de mortiers ou de bétons consiste à déterminer la quantité d'eau libre contenu dans un échantillon à l'état saturé d'eau. Le poids de

l'échantillon à l'état saturé ainsi que son volume sont déterminés initialement puis, par la suite, on sèche l'échantillon à une température maximale de 105 °C car au-delà de cette température, une partie de l'eau fixée chimiquement peut être extraite. Le pourcentage de vide est obtenu en divisant le volume d'eau extrait par le volume de l'échantillon, multiplié par 100 (Nyame et Illiston, 1980 et Goto et Roy, 1981).

Au sujet de la température de séchage, Lehoux (1987, com. pers.) nous signalait qu'au-dessus de 85 °C, il est possible qu'une partie de l'eau extraite provienne de l'ettringite mais la quantité d'eau associée à l'ettringite demeure tout de même faible.

D'après Feldman et Cheng-yi (1985), seule la méthode de mesure de porosité à l'eau permet de mesurer la porosité totale de mélanges fumée de silice condensée-ciment.

La porosité totale de pâtes, mortiers et bétons peut être également facilement obtenue à l'aide d'un picnomètre à hélium (Watson, 1981 et Parcevaux, 1984).

IV.4.2- LA METHODE D'ECHANGE EAU-METHANOL

Cette méthode consiste à mesurer la porosité totale d'un échantillon en mesurant la quantité de méthanol qui pénètre dans un échantillon préalablement saturé d'eau puis, par la suite, trempé dans du méthanol. Le méthanol (CH_3OH) est réputé remplacer totalement l'eau libre. Connaissant la densité du méthanol et le poids de méthanol échangé, il est possible de mesurer la porosité totale de l'échantillon.

Cette méthode effectuée en pesée continue permet aussi de définir 3 taux de diffusion du méthanol à travers le réseau de pore des échantillons examinés. Des essais effectués par l'auteur sur des échantillons de pâtes pures ont permis d'établir des courbes où 3 taux de diffusion sont nettement discernables. Il y a d'abord une phase rapide d'extraction de l'eau des gros pores, puis une phase plus lente et prolongée d'extraction de l'eau des pores capillaires et, finalement, une troisième phase de quasi-équilibre où l'eau des pores du gel entre en jeu.

Quoiqu'intéressante, cette méthode demeure quelque peu fastidieuse et ne s'applique qu'à des échantillons de pâtes pures ou de mortiers de faibles dimensions. Dans notre cas, nous avons utilisé des échantillons de 3.0 mm d'épaisseur et les temps d'échange requis étaient de l'ordre de 24 heures. Les dimensions minimales requises

pour des échantillons de béton entraînent des temps d'échange extrêmement long, i.e., plusieurs semaines. Afin d'en savoir plus sur ce sujet, nous recommandons de consulter les auteurs suivants: Parrott et al., 1980, Parrott, 1981, Blanc, 1982, Parrott, 1983, Feldman, 1985 et Patel et al., 1985).

IV.4.3- LA POROSIMETRIE AU MERCURE

La méthode de porosimétrie au mercure consiste à faire pénétrer progressivement du mercure dans des échantillons de pâtes pures, de mortiers ou de bétons préalablement séchés sous vide. Les pressions maximales d'intrusion utilisés sont de l'ordre de 422 MPa (60 000 lb/po.^{2}) (Diamond, 1971). Un essai consiste à noter le volume de mercure qui pénètre dans l'échantillon en fonction de la pression d'intrusion appliquée. Le diamètre des pores inventoriés varie entre quelques dizaines d'angstroems (10^{-9}m) à quelques centaines de microns (10^{-4}m). Au-dessus de cette valeur, la méthode ne permet pas de déterminer quel volume correspond à telle dimension mais le volume de mercure qui pénètre au-dessus de cette valeur est tout de même noté afin de déterminer la porosité totale de l'échantillon.

L'équation qui permet de relier la pression d'intrusion du mercure et le rayon des pores pénétrés par le mercure est la suivante: (Midgley et Illiston, 1983)

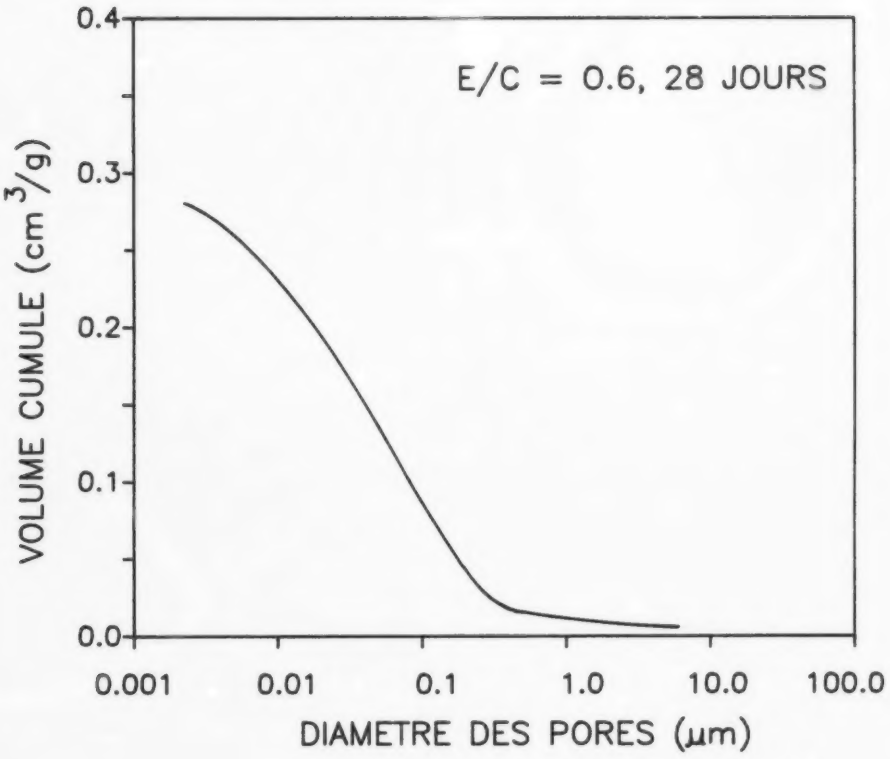


Fig. 8-Exemple d'une courbe de distribution de la taille des pores obtenue par porosimétrie au mercure (volume par unité de poids des échantillons). (Adapté de Diamond, 1971)(Pâtes)

$$R = \frac{-2Y \cos\theta}{P} \qquad (4.1)$$

où R = Rayon du pore pénétré par le mercure

Y = Tension de surface du mercure (0.48 N/mm²)

θ = Angle de contact du mercure (117° à 140°)

P = Pression appliquée (cm²/g)

La porosimétrie au mercure a été utilisée abondamment au cours des 50 dernières années pour caractériser la porosité des pâtes de ciment hydratées et beaucoup d'autres matériaux poreux. D'après Shi et Winslow (1985), il appert cependant qu'en ce qui concerne les pâtes de ciment hydratées, certains problèmes subsistent. Ils notent qu'aux pressions d'intrusion utilisées, des dommages sont provoqués à l'intérieur du réseau de pores des pâtes examinées. De plus, ils démontrent que l'angle de contact utilisé pour effectuer les calculs n'est pas fixe mais varie en fonction de l'âge, de la composition des échantillons et varie également selon que l'essai effectué est la première ou la seconde intrusion appliquée à l'échantillon. D'après leurs travaux, cet angle varie entre 123° et 135°. Dans leur cas, les erreurs dans la détermination des diamètres des pores ont pu atteindre 13% pour un échantillon testé à 1 et 28 jours. Sur des pâtes avec et sans cendres volantes, ils estiment une erreur possible de 23% due à la variation de l'angle de contact du mercure. Ils mentionnent que la plupart du temps, c'est une valeur de 140° qui est considérée par les utilisateurs de cette méthode (ex.: Nyame et

Illiston, 1980), ce qui donne des résultats nécessairement faux. S'ajoutent à ceci les erreurs provoquées par la modification irréversible de la microstructure des échantillons induite par le traitement de séchage et de mise sous vide poussé que subissent les échantillons avant les essais.

Quoique très utilisée, la porosimétrie au mercure n'est certes pas sans défaut et les chiffres obtenus à partir de cette méthode ne sont probablement pas fiables à 100%.

IV.4.4- LA METHODE DE CONDENSATION CAPILLAIRE

Cette méthode est basée sur l'application de l'équation de Kelvin (Diamond, 1971) aux isothermes d'adsorption et de désorption. Les gaz habituellement utilisés sont l'azote, le benzène et le n-butane (Lawrence et al., 1980). Contrairement à la capacité de la porosimétrie au mercure de permettre l'investigation d'une vaste gamme de diamètres de pore, la méthode de condensation capillaire se limite à des diamètres s'échelonnant de quelques dizaines d'angstroems à plusieurs centaines d'angstroems (10^{-9}m à 10^{-7}m), i.e., environ 20 Å à 1000 Å. La limite supérieure est fixée par les procédures de calcul, la plupart arrêtant à 300 Å ou 600 Å. Cette limite est inhérente à la forme de l'équation de Kelvin, qui, pour des pores cylindriques, est:

$$D = \frac{-4\tau\cos\theta}{pRT\ln(P/P_o)} \qquad (4.2)$$

où D = Diamètre du pore où la condensation a lieu

τ = Tension de surface du gaz liquéfié

θ = Angle de contact (habituellement = 0)

p = Densité du gaz liquéfié

R = Constante des gaz

T = Température en degré Kelvin

P/P_o = Pression de vapeur relative à laquelle la condensation capillaire se produit

Le terme $\ln(P/P_o)$ est la valeur limitative car il tend vers 1 pour des pressions relatives correspondant à des diamètres de pore de quelques centaines d'angstroems et plus. Autrement dit, le changement dans le rapport P/P_o correspondant à une augmentation du diamètre de 500 Å à 600 Å est très faible. Il est donc pratiquement impossible d'attribuer une quantité de gaz liquifié remplissant des pores de plusieurs centaines d'angstroems à une classe spécifique de diamètres.

Cette méthode de condensation capillaire montre des désaccords importants lorsqu'on compare les résultats obtenus par cette méthode à ceux obtenus par la porosimétrie au mercure. De plus, cette méthode couvre un éventail de diamètres de pore beaucoup plus restreint. D'un autre côté, la méthode de condensation capillaire semble mieux caractériser la partie des pores de très petites dimensions que la

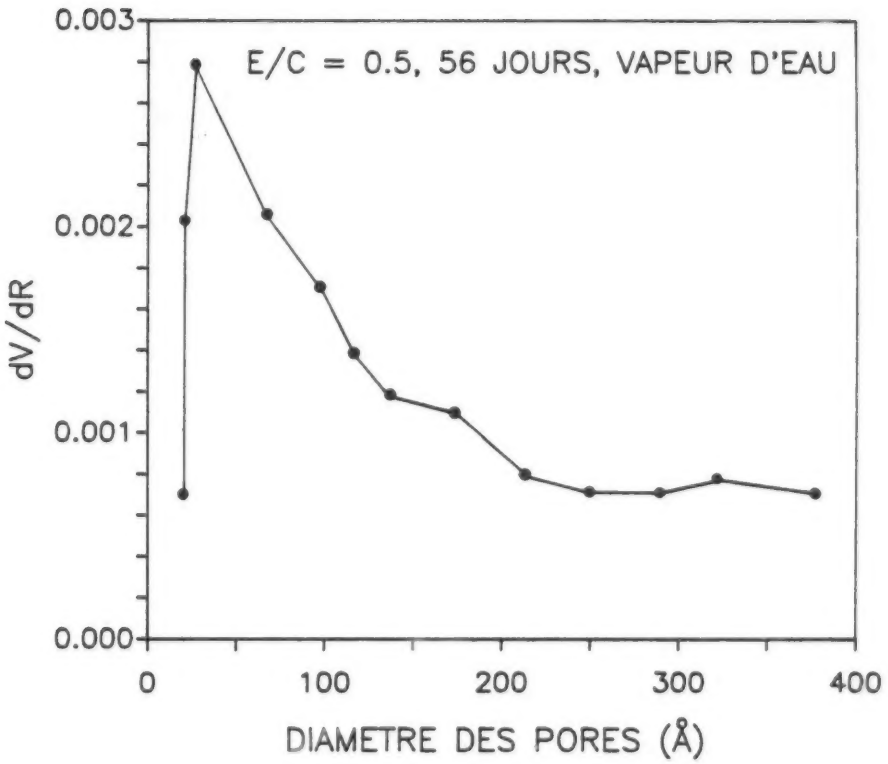


Fig. 9-Exemple de courbe de distribution de la taille des pores obtenue par condensation capillaire en utilisant la vapeur d'eau. (Adapté de Wittmann et Englert, 1967 dans Diamond, 1971) (Pâtes)

porosimétrie au mercure.

Une autre application du phénomène de la condensation capillaire est la détermination de la surface spécifique des matériaux poreux par la méthode originellement mise au point par Brunauer, Emmet et Teller (BET), vers les années 1940. Pour en savoir plus, consultez Brunauer et al. (1970), Fagerlund (1980), Older et Robler (1985) et Litvan et Myers (1983).

IV.4.5- LA MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

Quoique qualitatif, le MEB permet d'étudier plusieurs aspects micromorphologiques des pâtes de ciment hydratées. Citons la forme et la dimension des phases solides, leur distribution, ainsi que leur composition approximative lorsque l'appareil utilisé est équipé d'un détecteur de rayons X (Durand, 1985). Il est également possible d'observer la taille et la forme des pores, du moins jusqu'à des limites inférieures de l'ordre de la centaine d'angstroems (10^{-7}m) (Montgomery et al., 1981).

L'observation de pâtes, de mortiers ou de bétons en cassure fraîche a permis d'établir que les pores ne sont certes pas tous cylindriques ou sphériques, et que plusieurs géométries de pore existent. Ceci remet quelque peu en cause les méthodes de mesure de

la porosité au mercure ou par condensation capillaire où l'on assume au départ des formes de pore cylindriques.

IV.5- LA PERMEABILITE

Notre intérêt concernant la perméabilité du béton touche deux aspects. Il y a d'abord l'aspect de mobilité des ions de la solution interstitielle à l'intérieur de la pâte, du mortier ou du béton. Par exemple la perméabilité aux ions Cl^- du béton augmente en fonction du rapport eau-ciment (Midgley et Illiston, 1984).

Le deuxième aspect concerne la pénétration de solutions venant de l'extérieur. Dans le cas particulier des réactions alcalis-granulats, ce deuxième aspect trouve toute son importance dans les cas de contamination du béton par des solutions de NaCl provenant du sel de déglaçage. En fait, pour la province du Québec et ailleurs au Canada, considérer la contamination possible des bétons de structures routières par des sels de déglaçage est très pertinent.

Donc, une investigation de la perméabilité du béton se justifie au moins à deux niveaux distincts, soit la mobilité des ions à l'intérieur et la possibilité de contamination externe.

La perméabilité d'un béton n'est pas seulement fonction de la

porosité mais dépend également de la taille, de la distribution et de la continuité des pores en présence (Neville, 1983). La perméabilité du gel de C-S-H est de l'ordre de 7 X 10^{-12}cm/s, ce qui demeure très faible par rapport à la perméabilité du réseau des pores capillaires (20 à 100 fois plus perméable). La perméabilité d'une pâte durcie est essentiellement contrôlée par la perméabilité du réseau des pores capillaires. D'après Metha et Manmohan (1980), c'est plus particulièrement le volume des pores capillaires au-dessus de 1320 Å qui contrôle la perméabilité de la pâte durcie. De plus, dans un béton, il faut tenir compte de la présence des granulats qui, généralement, possèdent une perméabilité comparable à celle de la pâte durcie. Les données du tableau 3 permettent de comparer la perméabilité de pâtes de ciment avec différent rapport eau-ciment à celui de types de roches communes. Le tableau 4 permet également de comparer la variation de la perméabilité d'une pâte de ciment en fonction de son âge. A long terme, la perméabilité calculée pour une pâte de ciment avec un rapport eau-ciment de 0.7 serait de l'ordre de 6 X 10^{-11}cm/s par rapport à une perméabilité de 4 X 10^{-8}cm/s, à 5 jours. Un autre facteur qui influence la perméabilité est évidemment le rapport eau-ciment initial. Plus celui-ci est élevé, plus il y a de pores capillaires et plus la perméabilité est grande. Le tableau 5 montre des valeurs de perméabilité à l'eau pour des barrages des Etats-Unis. Les valeurs varient entre 8 X 10^{-10}cm/s à 28 X 10^{-10}cm/s.

IV.6- LES METHODES DE MESURE DE LA PERMEABILITE

IV.6.1- LA PERMEABILITE A L'EAU

Cette méthode consiste à forcer le passage d'eau à travers un échantillon de pâte, de mortier ou de béton. Afin d'éviter que l'eau ne sorte par les côtés de l'échantillon, on y applique une couche d'époxyde ou une membrane de caoutchouc, ou encore, les deux à la fois. L'eau désaérée doit donc traverser un échantillon de surface donnée et d'épaisseur donnée. Une pression supérieure à la pression interne est appliquée aux côtés de l'échantillon afin d'y coller la membrane de caoutchouc.

Pour une pression interne donnée, on mesure le débit d'eau à la sortie de l'échantillon et on peut ainsi déterminer un coefficient de perméabilité K_c.

$$K_c = \frac{dV \cdot H \cdot d_{H2O}}{dT \cdot P \cdot A} \qquad (4.3)$$

où K_c = Coefficient de perméabilité (cm/s)

dV/dT = Débit (cm^3/s)

H = Hauteur de l'échantillon (cm)

A = Surface de l'échantillon (cm^2)

d_{H2O} = Densité de l'eau (g/cm^3)

P = La pression interne appliquée (cm^2/g)

TABLEAU 3

COMPARAISON DE LA PERMEABILITE

DES ROCHES ET DE PATES DE CIMENT

(d'après Neville, 1983, p. 436)

TYPES DE ROCHES	COEFFICIENT DE PERMEABILITE (CM/S)	RAPPORT EAU/CIMENT DE PATES AYANT LA MEME PERMEABILITE
DIABASE	2.47×10^{-12}	0.38
DIORITE QUARTZITE	8.24×10^{-12}	0.42
MARBRE	2.39×10^{-11}	0.48
MARBRE	5.77×10^{-10}	0.66
GRANITE	5.35×10^{-9}	0.70
GRANITE	1.56×10^{-8}	0.71
GRES	1.23×10^{-8}	0.71

TABLEAU 4

DIMINUTION DE LA PERMEABILITE
DE PATES DE CIMENT EN FONCTION
DU DEGRE D'HYDRATATION

(E/C=0.7)

(d'après Neville, 1983, p. 437)

AGE (JOURS)	COEFFICIENT DE PERMEABILITE (CM/S)
FRAIS	2×10^{-4}
5	4×10^{-8}
6	1×10^{-8}
8	4×10^{-9}
13	5×10^{-10}
24	1×10^{-10}
ULTIME	6×10^{-11} (CALCULE)

TABLEAU 5

VALEURS TYPIQUES DE PERMEABILITE DE BETONS DE BARRAGES

(d'après Neville, 1983, p. 438)

TENEUR EN CIMENT (KG/M^3)	RAPPORT E/C	PERMEABILITE (10^{-10} CM/S)
156	0.69	8
151	0.74	24
138	0.75	35
223	0.46	28

Pour un béton conventionnel, la pression doit être appliquée pendant plusieurs jours avant que l'équilibre ne soit atteint.

La perméabilité à l'eau et au gaz des bétons n'est pas nécessairement la même (Neville, 1983). La mesure de la perméabilité au gaz des bétons se justifie lorsqu'il est trop difficile, voire impossible, de mesurer la perméabilité à l'eau d'un béton. Evidemment, la mesure de perméabilité au gaz des bétons se justifie également dans le cas de l'étude des phénomènes de carbonatation et d'oxydation du béton. Un exemple est celui de Vennesland et Gjorv (1984) qui ont étudié l'effet de la fumée de silice condensée sur la carbonatation et le transport de l'oxygène dans les bétons en rapport avec la corrosion des aciers d'armature. Ils rapportent que la fumée de silice a très peu affecté la carbonatation et le taux de transport de l'oxygène à travers les bétons étudiés.

IV.6.3- LA PERMEABILITE A LA VAPEUR

Il existe une méthode de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau pour des échantillons de pâte ou de mortier. Le principe de la méthode consiste à créer un gradient important d'humidité de chaque côté d'un échantillon. Pour ce faire, il s'agit de placer l'échantillon à l'embouchure d'un récipient étanche contenant un sel hygroscopique quelconque. Le degré d'humidité à l'intérieur du

récipient est généralement de 0%. A l'extérieur, il s'agit de maintenir un degré d'humidité contrôlé, de l'ordre de 50%. Dans ces conditions, virtuellement toute la vapeur est transmise par diffusion, la circulation capillaire est absente (Neville, 1983). En mesurant le poids initial et le poids après un certain temps prédéterminé, on obtient une valeur qu'on peut relier à la perméabilité à la vapeur de l'échantillon testé.

IV.6.4- LA PERMEABILITE AUX GAZ

A la section IV.3, nous avons mentionné les difficultés de mesurer la perméabilité à l'eau de bétons contenant de la fumée de silice. Puisque notre étude comprend des essais avec utilisation d'une fumée de silice, nous avons opté pour l'utilisation d'un perméamètre à azote. Ceci nous a permis d'obtenir des résultats assez rapidement comparativement à ce qui aurait pu être obtenu avec un perméamètre à eau.

La perméabilité aux gaz des bétons n'est pas constante mais augmente légèrement avec l'augmentation des pressions appliquées (Neville, 1983, Kasai et al., 1979 et Nagataki et Ujike, 1986). La perméabilité au gaz des bétons varie également en fonction du rapport eau-ciment, du degré de séchage (Beaudoin, 1982) et d'hydratation. C'est pour ces raisons que, lors de nos essais, pour comparer des

coefficient de perméabilité des échantillons avec et sans ajout, nous avons toujours utilisé la même pression, le même type de séchage et, dans la mesure du possible, le même temps d'hydratation.

A l'annexe C, on retrouve la description de l'appareil ainsi que le mode opératoire. Le principe de l'appareil est semblable à celui du perméamètre à eau décrit précédemment. Pour calculer le coefficient de perméabilité, nous utilisons la même formule que pour la perméabilité à l'eau (Loi de Darcy), sauf que nous remplaçons la densité de l'eau par la densité de l'azote à température ambiante.

CHAPITRE V

RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION*

V.1- LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES

Les figures 10 à 17 permettent de visualiser l'ensemble des résultats des essais d'expansion obtenus pour les échantillons de bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières en combinaison avec différents ajouts minéraux ou chimiques. Les pourcentages de remplacement du ciment du mélange de contrôle par les différents ajouts dans le mélange varient entre 0% et 10%. Nous présentons les résultats sous forme de graphiques où l'on observe les expansions obtenues en fonction du temps. Pour chacun des graphiques, nous présentons la courbe obtenue pour l'échantillon de contrôle (moyenne de 4 prismes) ainsi que les courbes obtenues pour les échantillons avec différents pourcentages de remplacement du ciment par un ajout minéral donné (moyenne d'expansion de 3 prismes pour chacun des pourcentages de remplacement).

* Essais d'expansion de prismes de béton selon la norme A23.2-14A (cure à 23 °C dans des contenants scellés). Les détails concernant les essais d'expansion sont donnés à l'annexe A.

La moyenne des expansions obtenues à 1 an pour les 4 prismes de contrôle, i.e. sans ajout, est de l'ordre de 0.16%. Cette valeur est nettement supérieure aux limites d'expansion maximales de 0.04% et de 0.075% à 1 an spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5). (Voir les tableaux A.6 et A.7 pour connaître les détails de ces spécifications).

La figure 10 permet d'observer que l'expansion de l'échantillon de contrôle (moyenne de 4 prismes) est lente pour les premières semaines, puis accélère pour atteindre un taux maximal entre 60 et 120 jours, pour ensuite ralentir progressivement et atteindre un plateau aux environs de 300 jours. Ce plateau se poursuit au-delà de 550 jours, soit l'âge maximum atteint par les échantillons au moment de la rédaction de cette thèse. Ce type d'évolution est donc conforme au type d'évolution normalement observé lors d'essais d'expansion de ce genre.

Aucun des ajouts utilisés ne provoque à 1 an des expansions supérieures à celle de l'échantillon de contrôle. Ceci est également vrai pour l'échantillon (moyenne de 2 prismes) dont l'ajout consiste en un surplus de NaOH qui équivaut à une teneur en alcalis du ciment de 2.07% de Na_2O équ. Cet échantillon a démontré une expansion initiale plus importante que celle de l'échantillon de contrôle mais à partir d'environ 90 jours, cette expansion demeure inférieure à celle de l'échantillon de contrôle.

En ce qui concerne l'efficacité des autres ajouts, elle varie d'à peu près nulle à très bonne. L'ajout qui s'est révélé le plus efficace est la fumée de silice condensée (FSC), à 5% et 10% de remplacement. Les diminutions d'expansion observées à 300 jours sont respectivement de 87% et de 102%. La comparaison des différents pourcentages de réduction d'expansion à 100, 200, 300, 400 et 500 jours semble toutefois indiquer une certaine diminution de l'efficacité de la FSC au fur et à mesure que le temps passe (à 5% de remplacement)(voir la figure 23). En d'autres termes, l'échantillon de béton (moyenne de 3 prismes) démontre un début d'expansion après 1 an; cependant cette expansion (0.026%) est nettement sous les limites d'expansion maximales spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5).

Parmi les autres ajouts utilisés, le laitier silicaté granulé (LSG) permet, à 300 jours, de bonnes réductions d'expansion aux 2 niveaux de remplacement utilisés, soit 5% et 10%. Les réductions d'expansion sont respectivement de l'ordre de 68% et 78% (voir la figure 24). A 1 an, les expansions obtenues sont très près ou supérieures aux limites d'expansion maximales spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5).

Nous terminerons cette section en mentionnant que l'ajout de 1.0% de Li_2CO_3 aux prismes de béton fabriqués pour cette étude a permis d'obtenir à 300 jours une réduction d'expansion de l'ordre de

65% tandis que l'ajout de 0.5% du même produit chimique a produit une réduction d'expansion de seulement 18% (voir la figure 25). Initialement, l'idée de mettre à l'essai le carbonate de lithium comme ajout provient de travaux effectués dans les années cinquante par McCoy et Caldwell (1951). Ceux-ci avaient obtenu de bonnes réductions d'expansion de barres de mortier de pyrex (norme ASTM C-444) en utilisant différents sels de lithium, dont le carbonate de lithium. L'intérêt d'utiliser des composés à base de lithium pour étudier les RAG réside dans le fait que le mécanisme par lequel le lithium agit sur les RAG est probablement purement chimique. Dans le cas des ajouts pouzzolaniques, les mécanismes de réduction des RAG sont probablement à la fois chimiques et physiques, donc nécessairement plus complexes à isoler.

Nous ne décrirons pas ici plus en détail les résultats des essais d'expansion obtenus pour le granulat de Trois-Rivières. Nous prions le lecteur de consulter les différentes figures se rapportant à ces résultats car elles permettent de synthétiser les résultats de façon rapide et claire.

V.2- GRANULAT D'OTTAWA

Les figures 18 et 19 permettent de visualiser l'ensemble des résultats d'expansion obtenus pour les échantillons de béton

fabriqués avec le granulat d'Ottawa en combinaison avec la FSC et le LSG. Les pourcentages de remplacement du ciment par ces ajouts sont de 5%, 10% et 15%. Nous présentons les résultats sous forme de graphiques où l'on observe les expansions obtenues en fonction du temps. Pour chacun des graphiques, nous présentons la courbe obtenue pour l'échantillon de contrôle (moyenne de 3 prismes) ainsi que les courbes obtenues pour les échantillons avec 5%, 10% et 15% d'ajout minéral (moyenne d'expansion de 3 prismes pour chacun des pourcentages de remplacement).

La moyenne des expansions obtenues à 1 an pour les 3 prismes de l'échantillon de contrôle, i.e. sans ajout, est de l'ordre de 0.125%. Cette valeur est nettement supérieure aux limites d'expansion maximales de 0.04% et de 0.075% spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5), à un an. La figure 18 permet d'observer que l'expansion de l'échantillon de contrôle (moyenne de 3 prismes) est lente pour les premiers jours, puis accélère pour atteindre un taux maximal entre 90 et 180 jours pour ensuite ralentir progressivement pour atteindre un plateau aux environs de 300 jours. Ce type d'évolution est légèrement différent de celui observé pour le granulat de Trois-Rivières en ce sens qu'il n'y a pratiquement pas de période d'initiation où l'expansion demeure peu importante pendant quelques semaines. Pour le reste, l'allure générale de la courbe est conforme au type d'évolution normalement obtenu lors d'essais d'expansion de ce genre.

Les échantillons contenant la FSC démontrent à 1 an des expansions nettement inférieures à celle de l'échantillon de contrôle. Cependant, à 5% de remplacement, malgré une forte réduction d'expansion, nous avons tout de même obtenu une expansion de l'ordre de 0.028% (moyenne de 3 prismes). L'allure de la courbe semble indiquer que l'expansion va se poursuivre quelque peu, du moins pendant un certain temps. Cette valeur demeure toutefois inférieure aux limites d'expansion maximales spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5). A 10% et 15% de remplacement, les expansions observées demeurent inférieures 0.006%, soit de l'ordre de 15 fois inférieures à celle de l'échantillon de contrôle. Aux 3 niveaux de remplacement, à 100, 200 et 300 jours, les pourcentages de réduction d'expansion se situent entre 81% et 99% (voir la figure 27).

Les échantillons contenant le LSG démontrent à 1 an des expansions inférieures à l'expansion de l'échantillon de contrôle (moyenne de 3 prismes). Cependant, l'efficacité de l'ajout diminue avec le temps (voir la figure 19). A 300 jours, les réductions d'expansion varient entre 35% et 59% (voir la figure 28). C'est à 15% de remplacement que l'efficacité observée est la plus grande. Pour ce qui est des échantillons avec 5% et 10% de LSG, il se produit une inversion dans l'ordre de l'efficacité, i.e. qu'à 100 jours, une meilleure réduction d'expansion est obtenue pour l'échantillon avec 5% de LSG que pour celui avec 10% de LSG. A 200 et 300 jours, l'ordre d'efficacité redevient croissant en fonction du pourcentage de LSG

présent.

Dans l'ensemble, après 1 an, les expansions observées pour les 3 niveaux de remplacement sont supérieures aux limites d'expansion maximales spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5). De plus, l'allure des courbes des expansions en fonction du temps des échantillons est quelque peu différente de celle de l'échantillon de contrôle. En effet, nous observons une longue période, de l'ordre de 180 jours, au cours de laquelle peu d'expansion est observée (moins de 0.1%). Cependant, après cette période, l'expansion augmente abruptement pour ensuite se stabiliser vers l'âge de 1 an. L'allure générale des courbes est donc normale à l'exception de la longue période d'initiation en comparaison avec l'échantillon de contrôle.

V.3- GRANULAT DE SHERBROOKE

Les figures 20 à 22 permettent de visualiser l'ensemble des résultats d'expansion obtenus pour les échantillons de béton fabriqués avec le granulat de Sherbrooke en combinaison avec la FSC et le LSG. Les pourcentages de remplacement du ciment par ces ajouts sont de 5%, 10% et 15%. Nous présentons les résultats sous forme de graphiques où l'on observe les expansions obtenues en fonction du temps. Pour chacun des graphiques, nous présentons la courbe obtenue pour l'échantillon de contrôle (moyenne de 4 prismes) ainsi que les

courbes obtenues pour les échantillons avec 5%, 10% et 15% d'ajout minéral (moyenne d'expansion de 3 prismes pour chacun des pourcentages de remplacement).

L'expansion obtenue à 1 an pour l'échantillon de contrôle (moyenne de 4 prismes) est de l'ordre de 0.061%. Cette valeur est supérieure à une des limites d'expansion maximales spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5). L'échantillon démontre une période de plusieurs semaines sans expansion vraiment importante pour ensuite démontrer une expansion lente et régulière qui ne semble pas terminée après 1 an., ni même après 600 jours.

A 300 jours, les réductions d'expansion avec 5%, 10% et 15% de FSC sont respectivement de 69%, 90% et 107% (voir la figure 29). Dans ce cas-ci, tous les niveaux de remplacement sont valables pour maintenir les expansions sous les limites d'expansion maximales spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5).

A 200 jours, les réductions d'expansion avec 5%, 10% et 15% de LSG sont respectivement de 58%, 63% et 83% (voir la figure 30). Au moment de la rédaction de cette thèse, nous n'avons pas de résultats au-delà de 200 jours pour les échantillons avec 5% et 15% de remplacement mais nous estimons, sous toutes réserves, qu'à 1 an tous les niveaux de remplacement seront valables pour maintenir les expansions sous les limites maximales spécifiées par la norme CSA

A23.2-14A (clause 2.5).

V.4- DISCUSSION

L'efficacité de la FSC à diminuer les expansions dues aux réactions alcalis-granulats demeure constante pour les 3 granulats utilisés pour cette étude. En effet, pour les 3 granulats, 5% et plus de remplacement du ciment par la FSC diminue les expansions de façon importante. Cependant, l'allure des courbes laisse entrevoir que l'expansion des échantillons avec 5% de FSC n'est pas terminée malgré une cure à 38 °C et à plus de 95% d'humidité relative pendant plus d'un an. Il reste à déterminer si les limites d'expansion maximales spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5) peuvent tout de même être utilisées dans ce cas-ci étant donné que l'allure des courbes indiquent que les expansions ne sont pas terminées et que les limites de cette norme pourraient être éventuellement dépassées.

A 10% de remplacement, pour les 3 granulats, la FSC arrête presque complètement les expansions dues aux réactions alcalis-granulats. De plus, l'allure des courbes d'essais d'expansion indique que l'efficacité de la FSC à un tel niveau de remplacement est stable dans le temps (au-delà de 550 jours dans le cas du granulat de Trois-Rivières). A 15% de remplacement, pour les granulats d'Ottawa et de Sherbrooke, la FSC empêche complètement les

expansions de se manifester. Cette efficacité est également stable dans le temps. Le granulat de Trois-Rivières n'a pas fait l'objet d'essais d'expansion avec un tel niveau de remplacement.

Une des particularités des essais d'expansion effectués avec la FSC est le retrait initial observé dans certains cas, notamment à 10% et plus de remplacement. Le retrait maximal observé lors de nos essais est de l'ordre de 0.01% et il arrive que ce retrait ne se résorbe pas durant toute la durée des essais, ce qui explique les pourcentages de réduction d'expansion supérieurs à 100% (ex.: granulat d'Ottawa, à 15% de FSC et le granulat de Trois-Rivières, à 10% de remplacement).

Houde (1987) a obtenu des résultats similaires pour le granulat de Trois-Rivières combiné avec de la FSC dans le cas d'essais d'expansion de barres de mortier (norme ASTM C-227). En fait, d'après cet auteur, dans le cas des barres de mortier fabriquées avec une teneur en alcalis du même ordre de grandeur que nos prismes de béton, c'est seulement à 15% et plus de FSC que le retrait initial ne se résorbe pas totalement. Pour une addition de 11% de FSC, cet auteur a tout de même obtenu près de 0.07% d'expansion à 650 jours, soit une réduction d'expansion de l'ordre de 67%. Dans le cas de la présente étude, nous avons obtenu une réduction d'expansion de l'ordre de 101% à 500 jours à 10% de remplacement, soit -0.003% d'expansion. Les différences observées ici confirment combien les corrélations entre

les résultats d'essais d'expansion effectués à partir de mortiers et de bétons peuvent être difficiles à effectuer.

L'efficacité du LSG à diminuer les expansions dues aux réactions alcalis-granulats varie quelque peu pour les 3 granulats utilisés. Dans l'ensemble, après 300 jours, l'efficacité du LSG à réduire les expansions dues aux réactions alcalis-granulats est fonction du pourcentage de remplacement du ciment par le LSG. Dans l'ensemble, l'allure générale des courbes indique que l'expansion se stabilise après un certain temps, du moins pour les granulats de Trois-Rivières et d'Ottawa. Dans le cas du granulat de Sherbrooke, les essais ne sont pas encore suffisamment avancés pour que nous puissions nous prononcer. En terme d'efficacité, pour un même niveau de remplacement, le LSG s'est montré plus efficace pour le granulat de Trois-Rivières que pour le granulat d'Ottawa, et ce malgré le fait que le granulat de Trois-Rivières se soit montré plus expansif que le granulat d'Ottawa.

Pour ces 2 granulats, aux niveaux de remplacement utilisés, nous jugeons que le LSG n'est pas suffisamment efficace pour maintenir les expansions sous les limites spécifiées par la norme CSA A23.2-14A (clause 2.5, classes d'exposition A, B et C).

Comme pour les échantillons contenant de la FSC, un retrait initial est observé dans certains cas mais celui-ci demeure tout même

peu important (inférieur à 0.05%). Dans tous les cas, ce retrait est compensé après un certain temps par les expansions dues aux réactions alcalis-granulats.

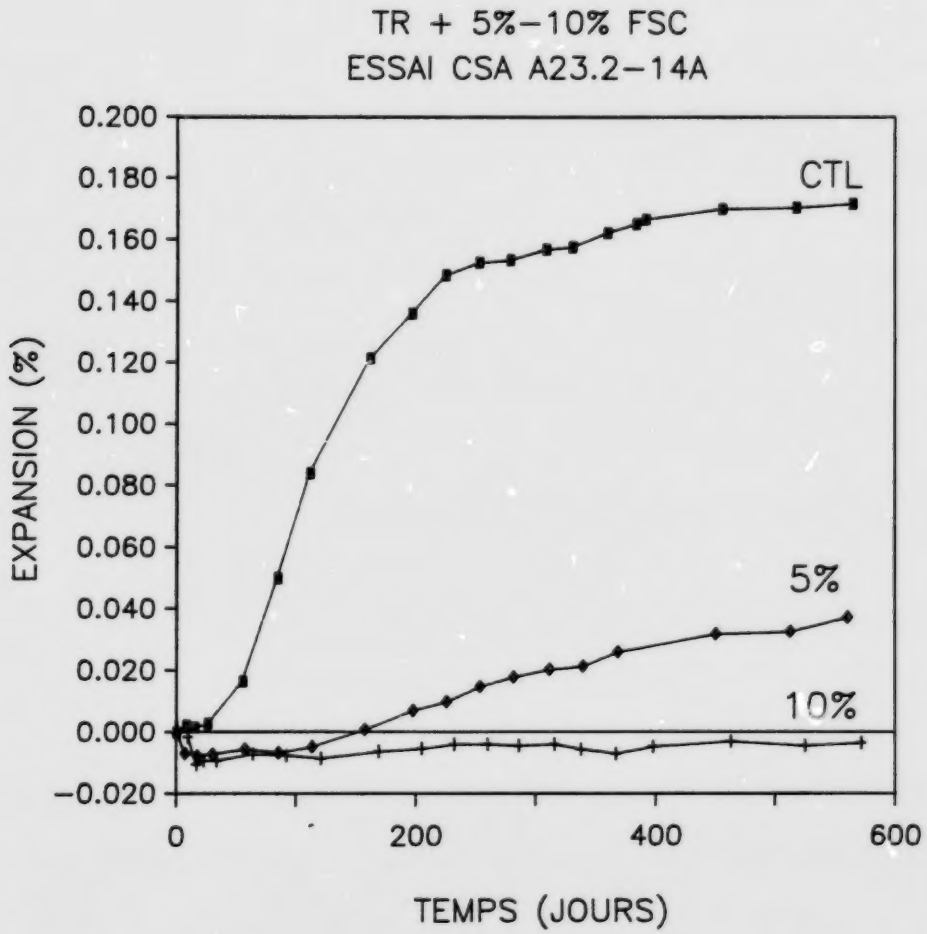


Fig. 10-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et fumée de silice condensée (FSC).

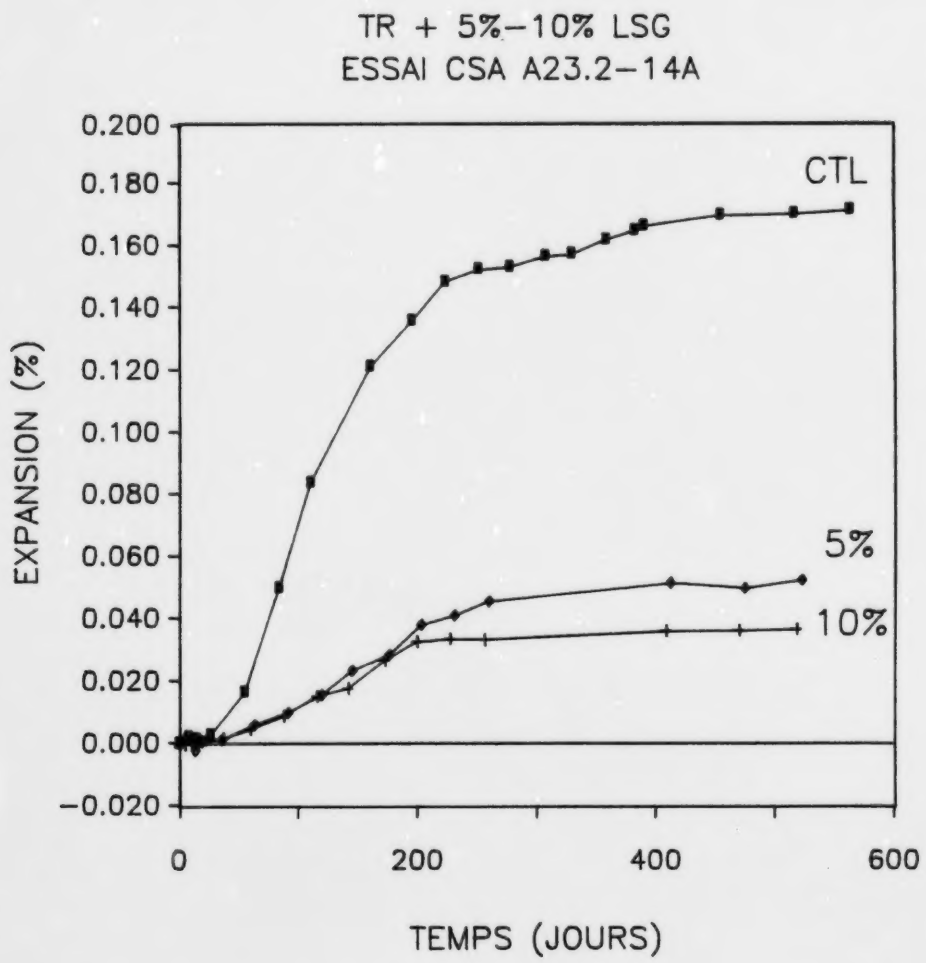


Fig. 11-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et laitier silicaté granulé (LSG).

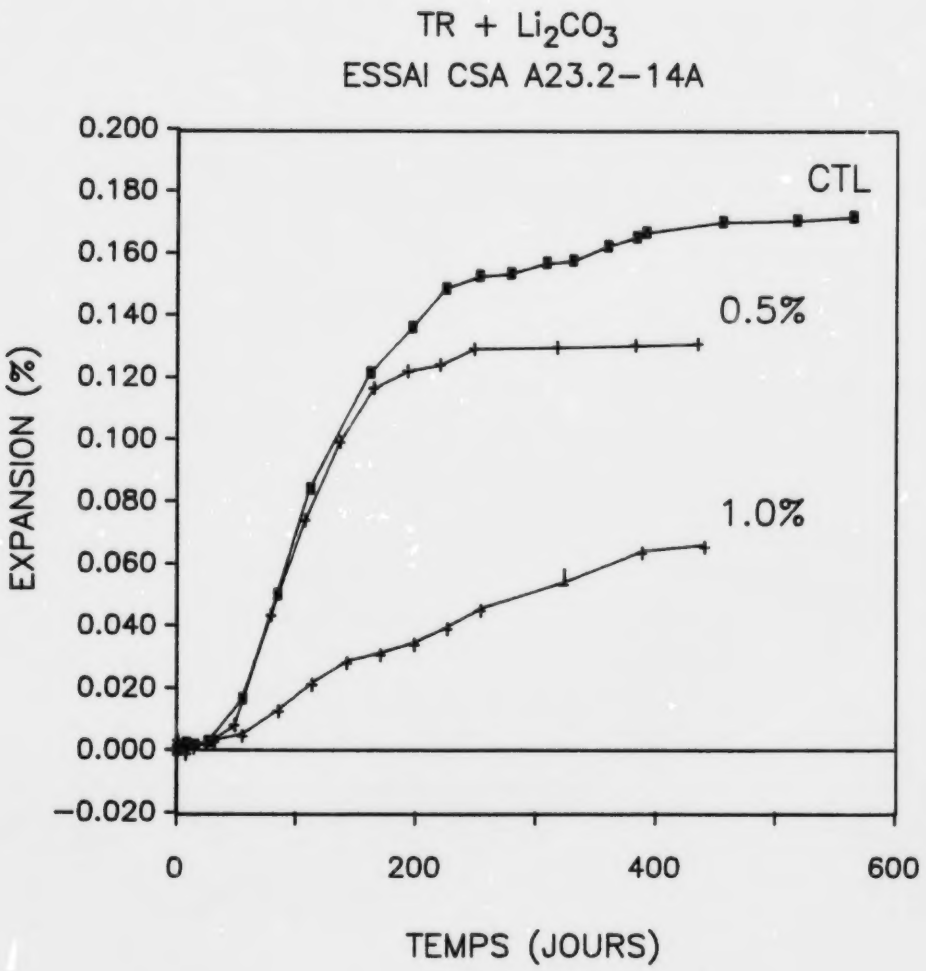


Fig. 12-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et Li_2CO_3.

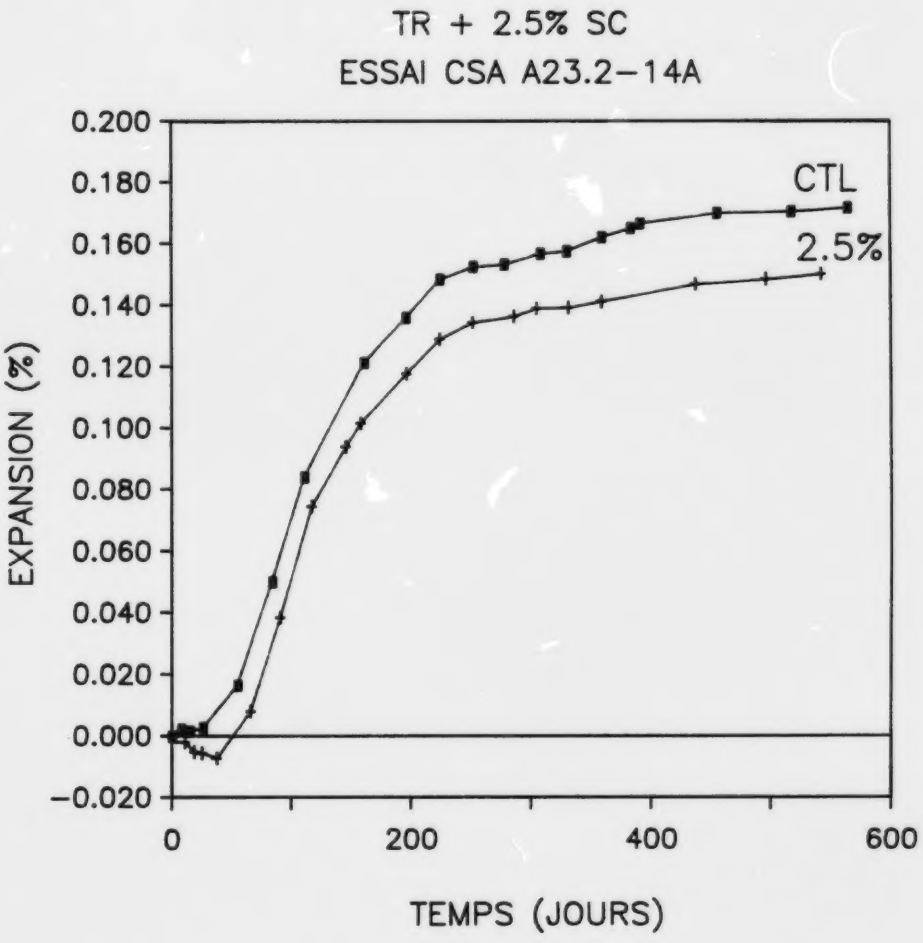


Fig. 13-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et silice colloïdale (SC).

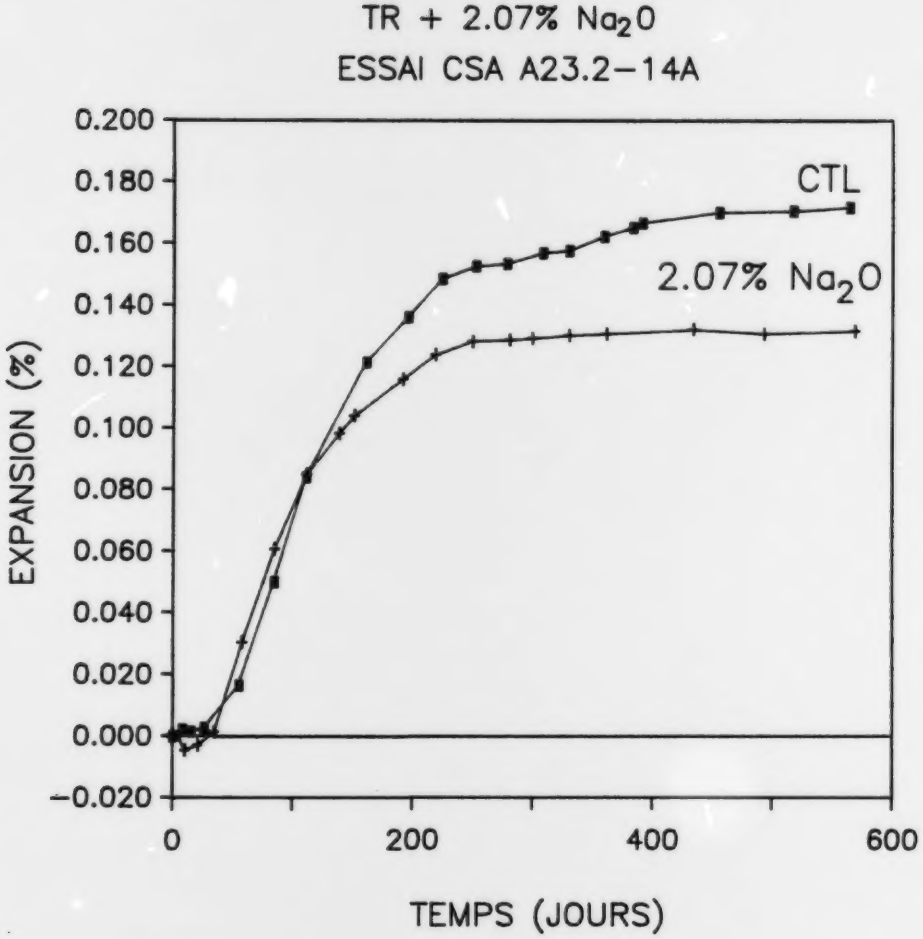


Fig. 14-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et NaOH. La teneur en alcalis du ciment a été augmentée 2.07% équ. par addition de NaOH à l'eau de gâchage.

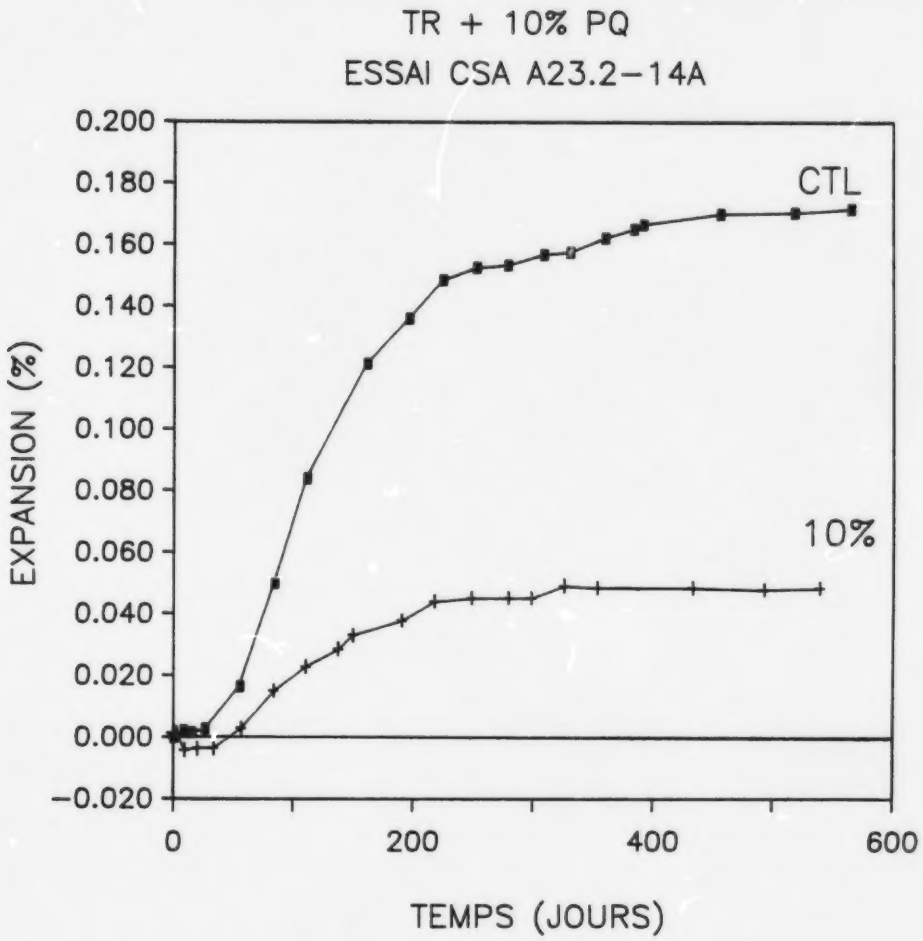


Fig. 15-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et poussière de quartz (PQ).

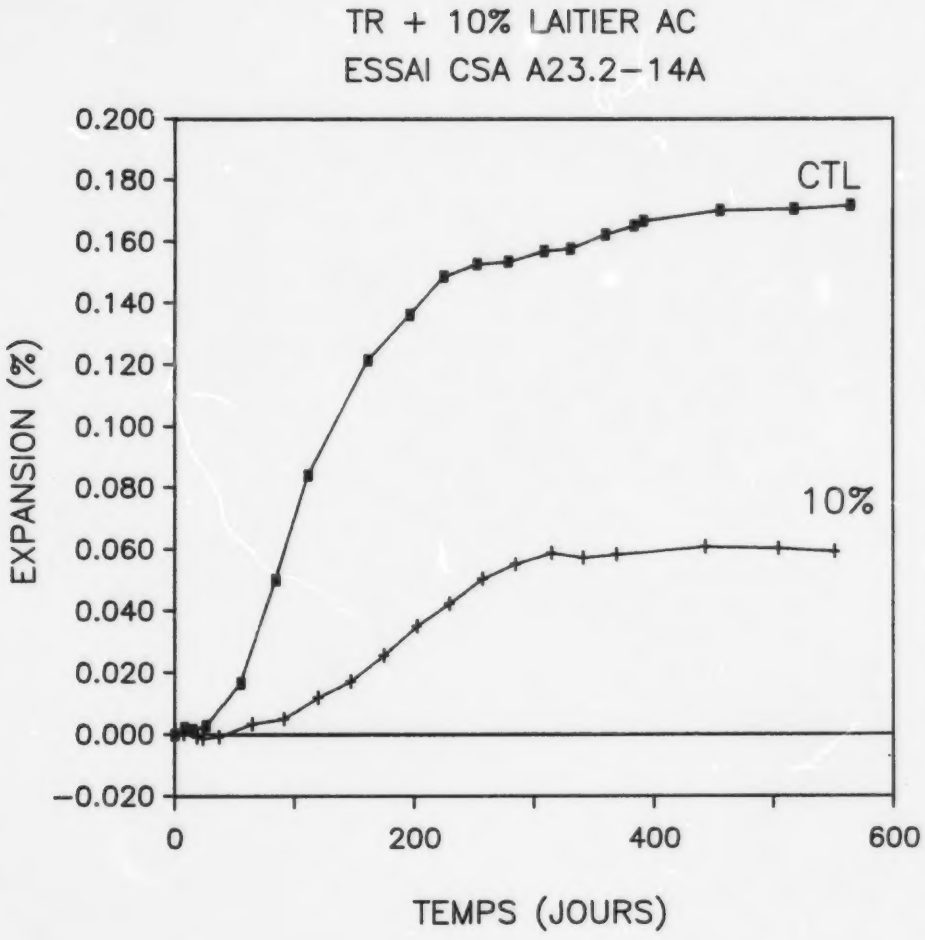


Fig. 16-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et laitier d'aciérie (AC).

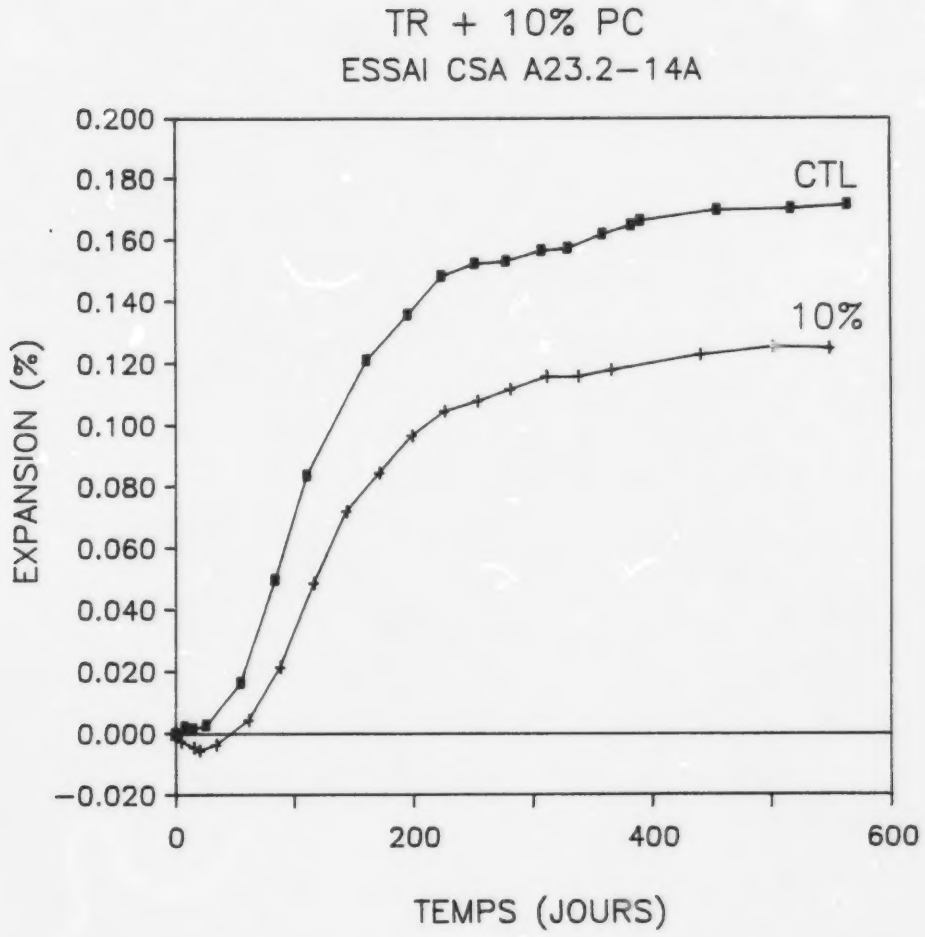


Fig. 17-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et poussière calcaire (PC).

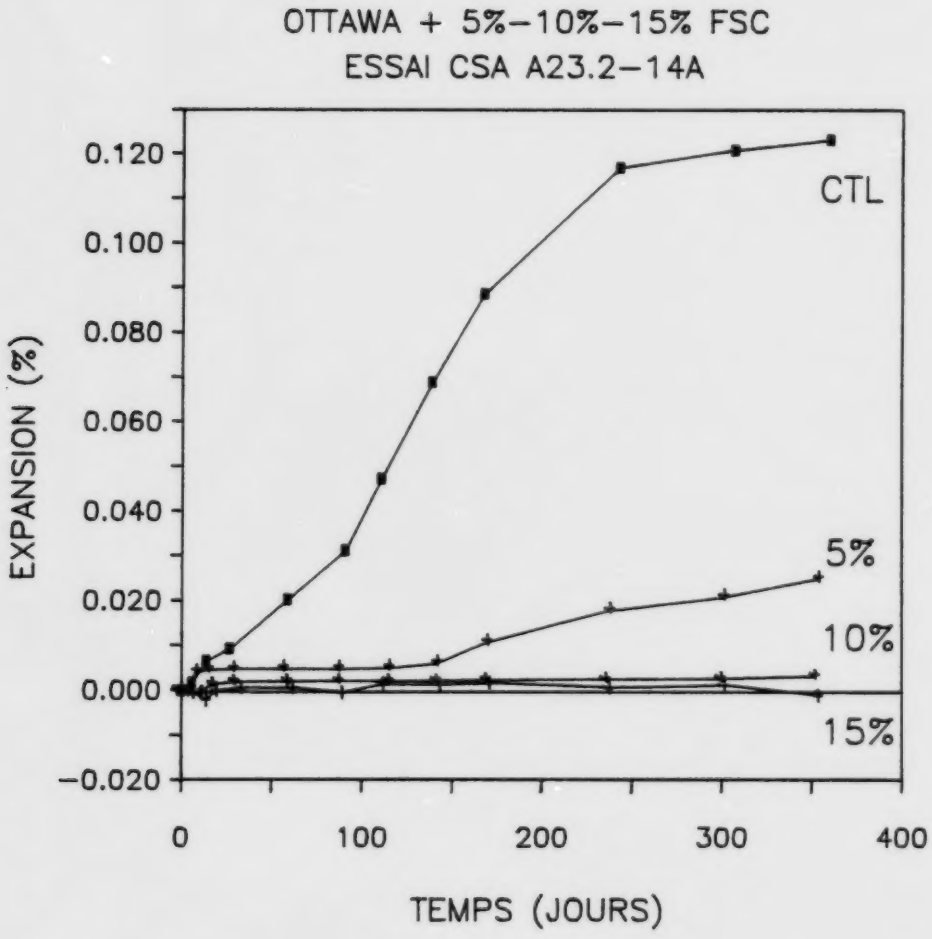


Fig 18-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat d'Ottawa et fumée de silice condensée (FSC).

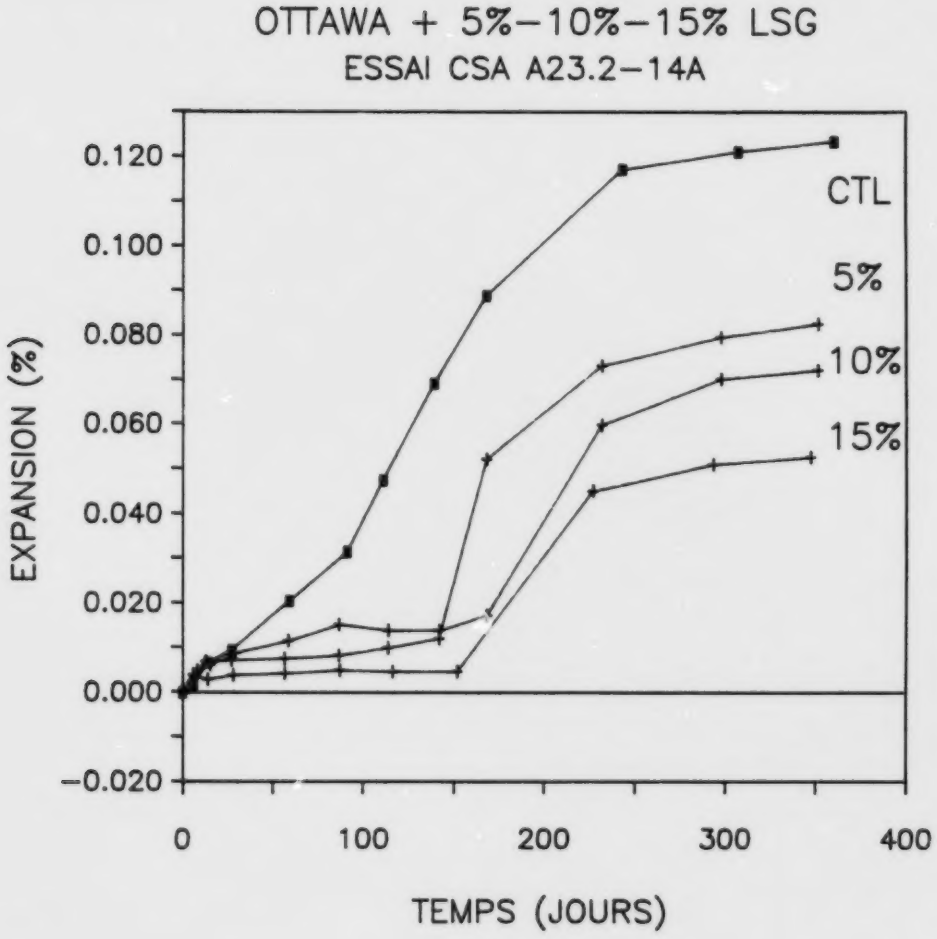


Fig. 19-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat d'Ottawa et laitier silicaté granulé (LSG).

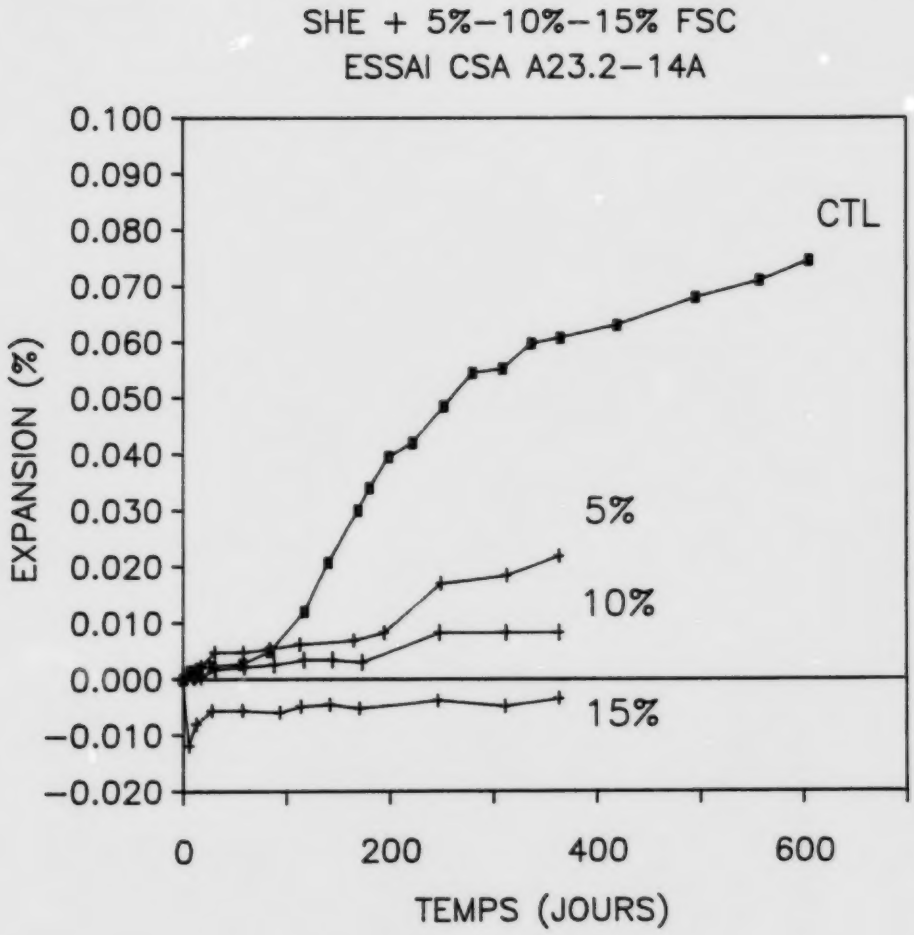


Fig. 20-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Sherbrooke et fumée de silice condensée (FSC).

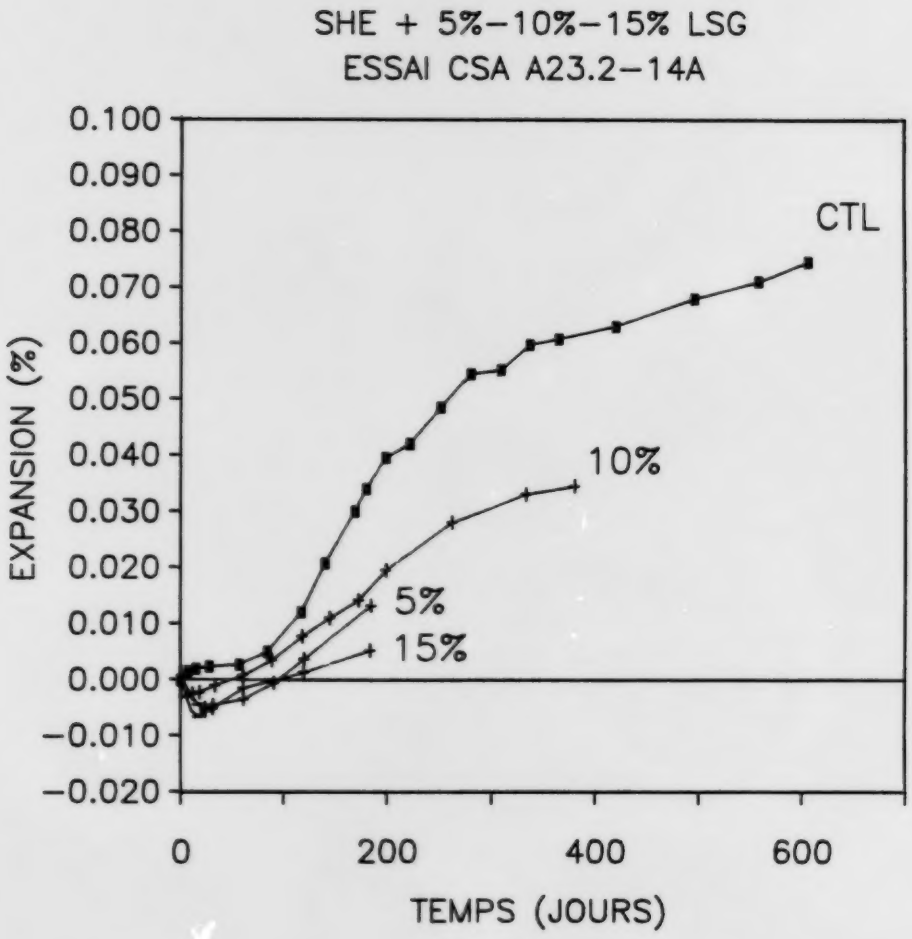


Fig. 21-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Sherbrooke et laitier silicaté granulé (LSG).

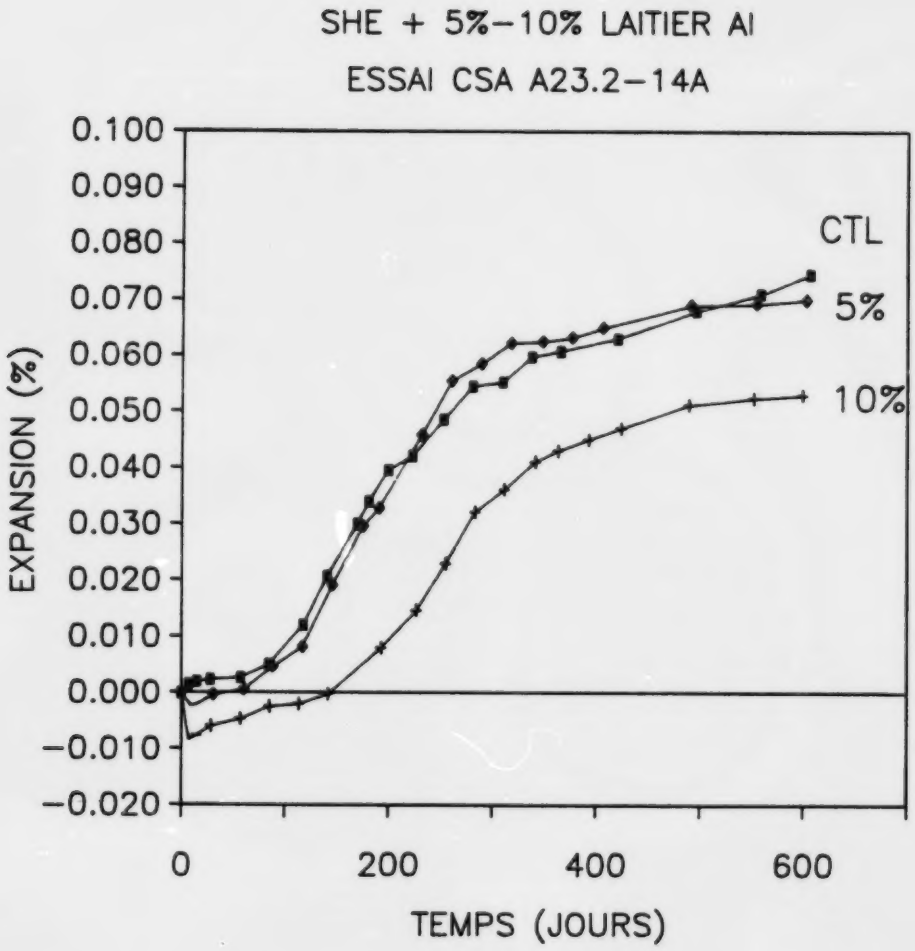


Fig. 22-Evolution de l'expansion des prismes de béton pour la combinaison granulat de Sherbrooke et laitier d'aciérie productrice d'acier inoxydable (AI).

EXPLICATION DES HISTOGRAMMES DES ESSAIS D'EXPANSION

Les valeurs (V) sont obtenues en calculant la différence entre le pourcentage d'expansion de ces prismes (A) et celui des prismes de contrôle (B). Cette différence est divisée par le pourcentage d'expansion des prismes de contrôle et multipliée par 100. (Pour un âge donné)

$$V = (A-B/B) \times 100$$

Les valeurs supérieures à 100% signifient que les prismes présentent du retrait. Les valeurs négatives signifient que le pourcentage d'expansion de l'échantillon en question est supérieur à celui de l'échantillon de contrôle.

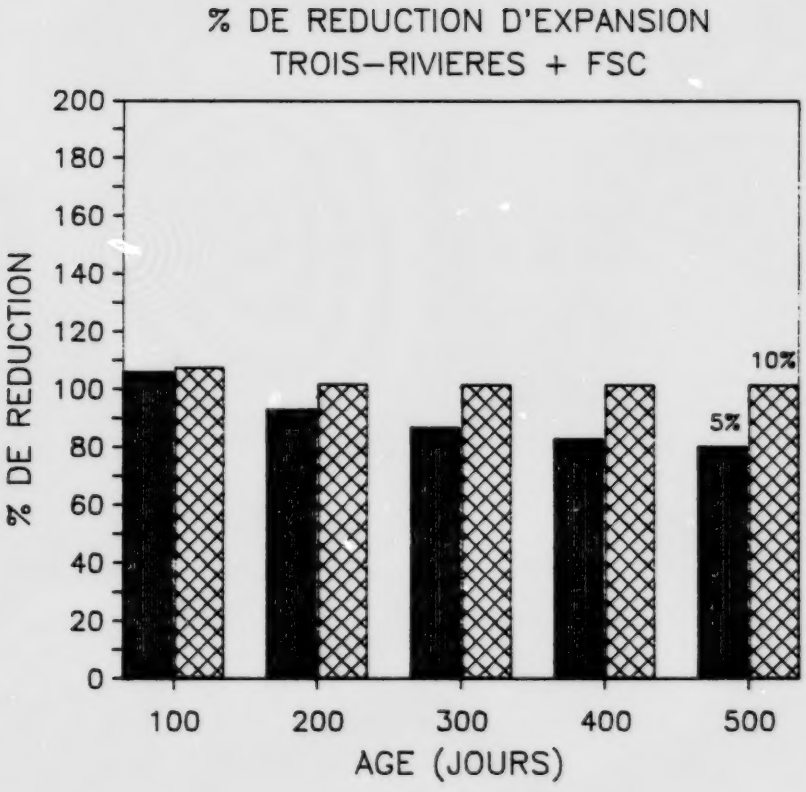


Fig. 23-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et fumée de silice condensée (FSC). (Voir la page 97 pour l'explication des histogrammes)

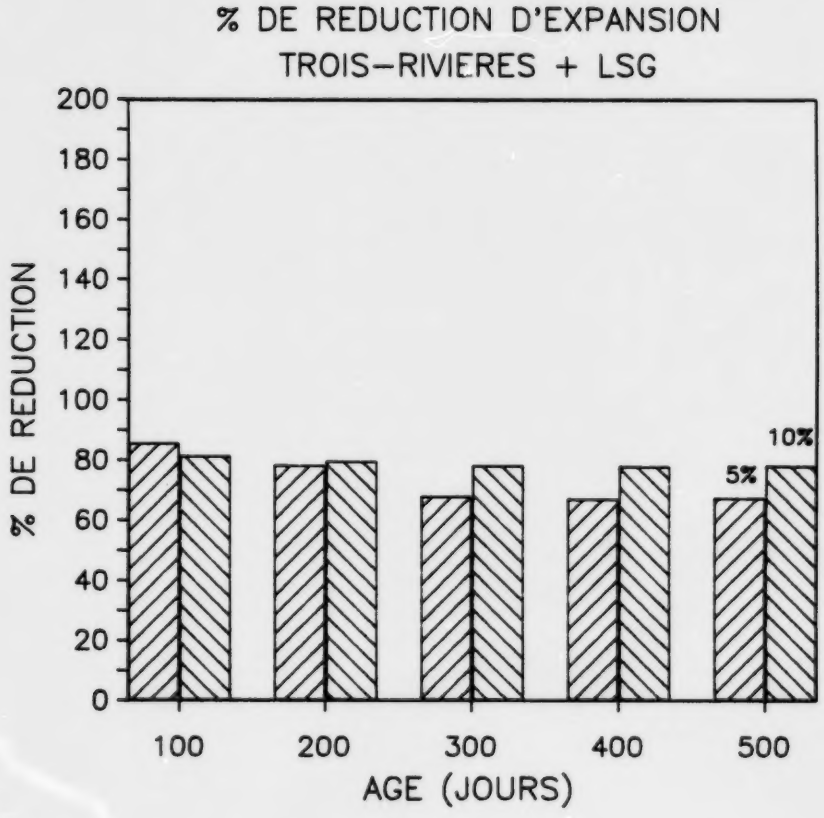


Fig. 24-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et laitier silicaté granulé (LSG). (Voir la page 97 pour l'explication des histogrammes)

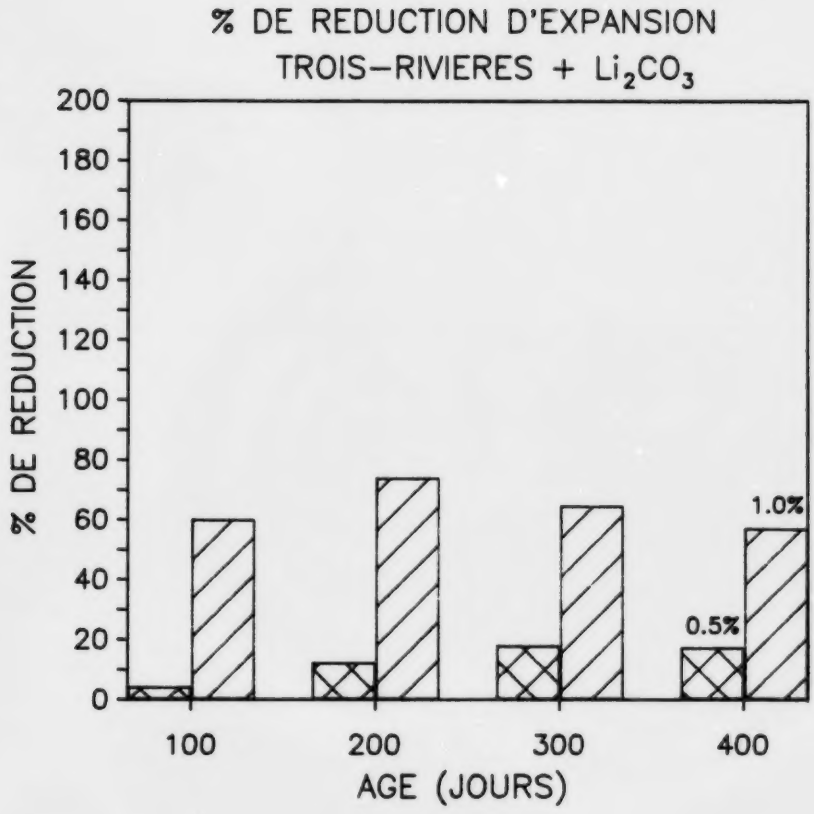


Fig. 25-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et Li_2CO_3. (Voir la page 97 pour l'explication des histogrammes)

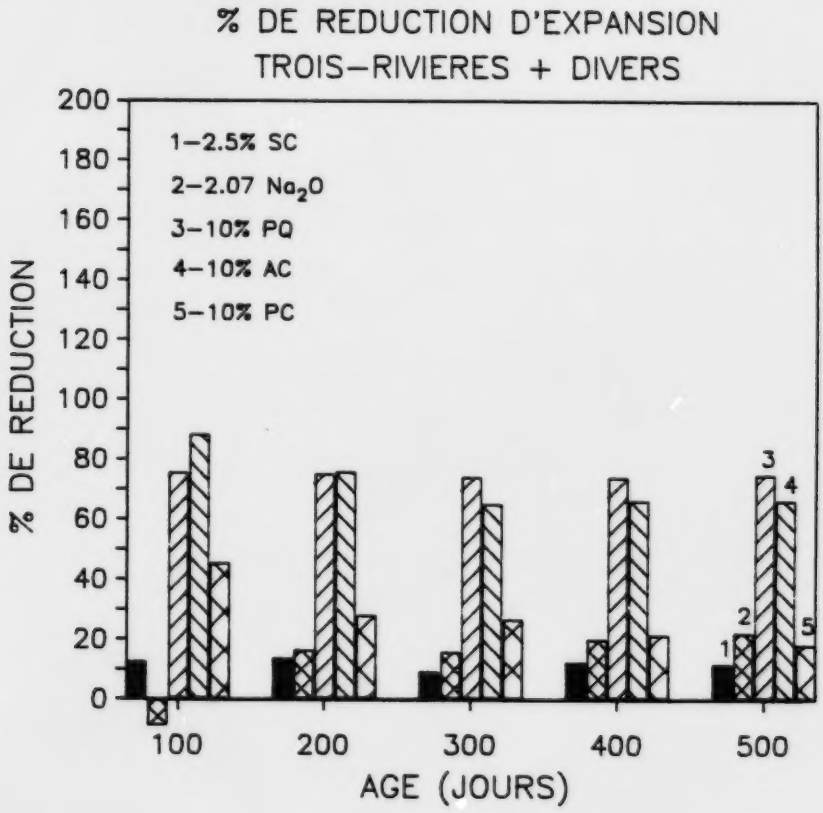


Fig. 26-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Trois-Rivières et divers ajouts. (SC = silice colloïdale, PQ = poussière de quartz, AC = laitier d'aciérie, PC = poussière calcaire) (Voir la page pour l'explication des histogrammes)

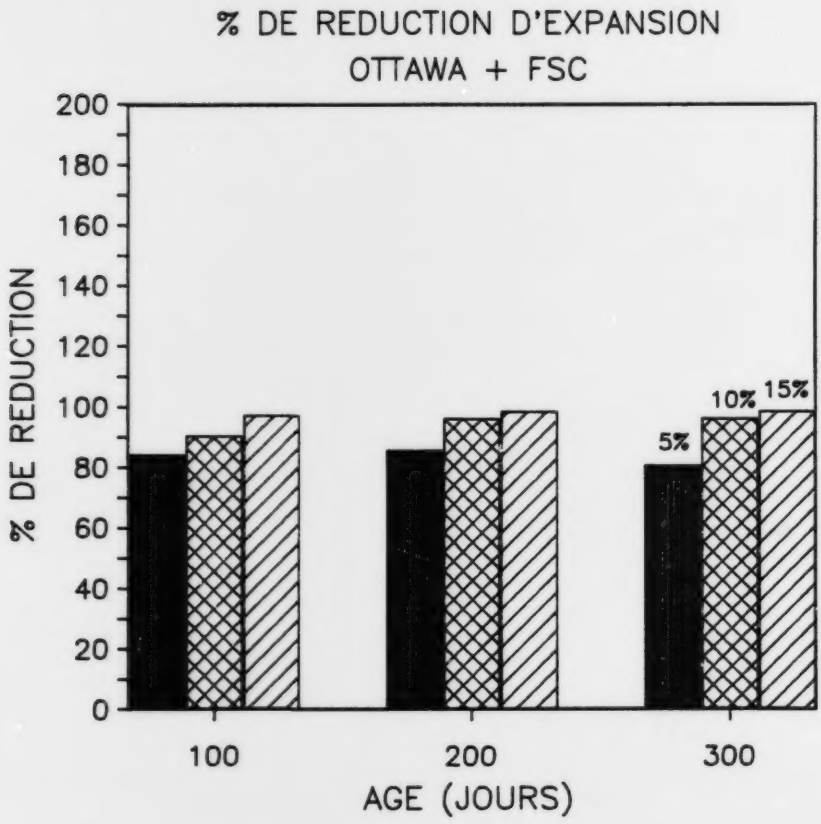


Fig. 27-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat d'Ottawa et fumée de silice condensée (FSC). (Voir la page 97 pour l'explication des histogrammes)

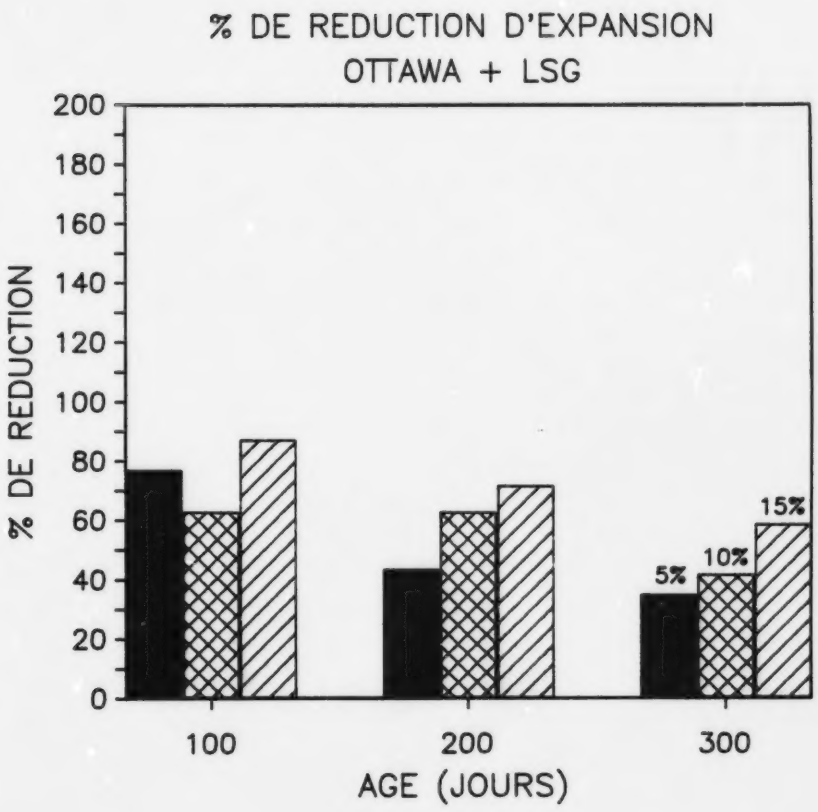


Fig. 28-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat d'Ottawa et laitier silicaté granulé (LSG). (Voir la page 97 pour l'explication des histogrammes)

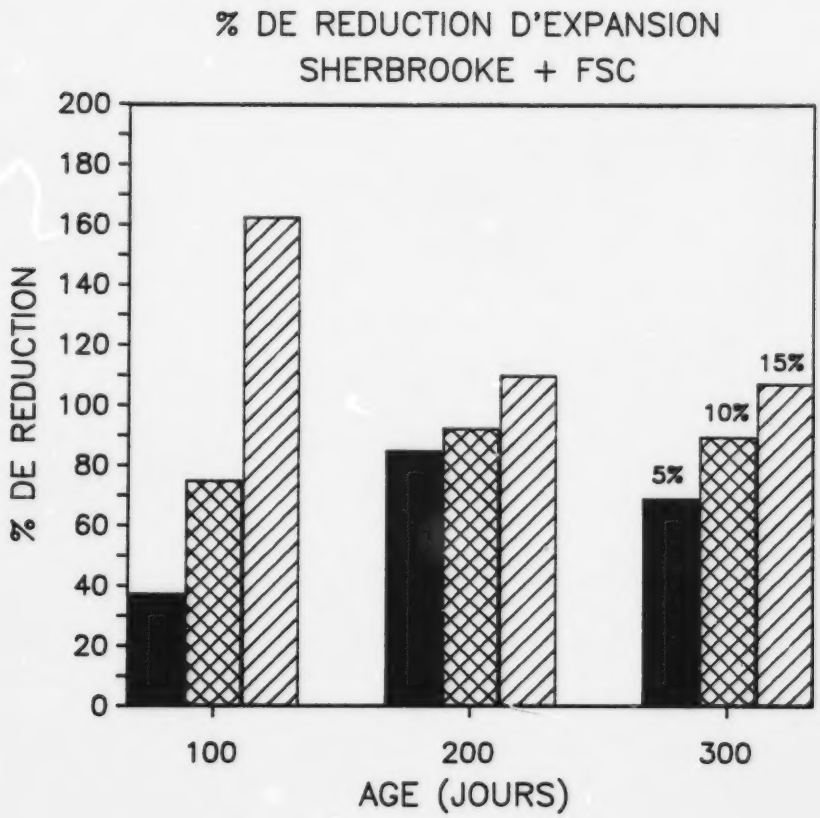


Fig. 29-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Sherbrooke et fumée de silice condensée (FSC). (Voir la page 97 pour l'explication des histogrammes)

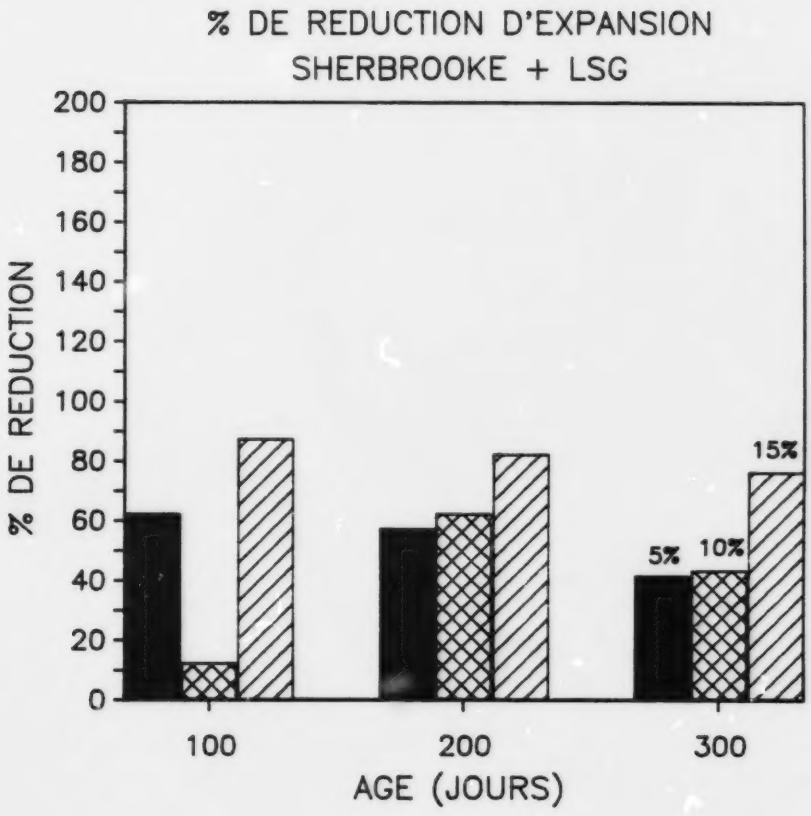


Fig. 30-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Sherbrooke et laitier silicaté granulé (LSG). (Voir la page 97 pour l'explication des histogrammes)

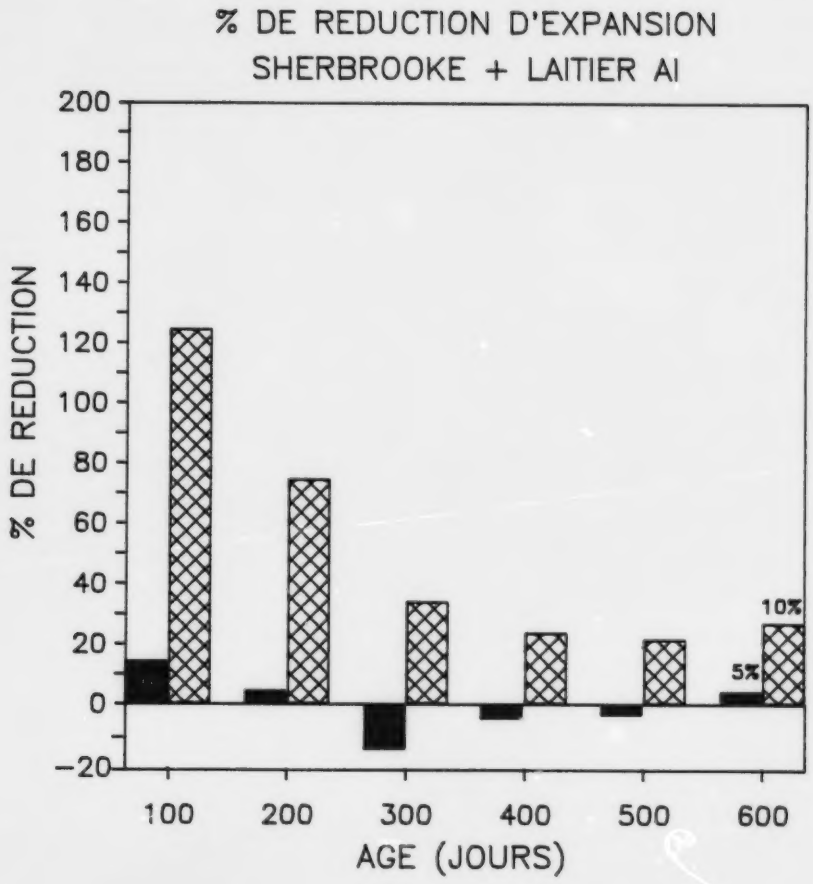


Fig. 31-Histogramme de réduction d'expansion des prismes pour la combinaison granulat de Sherbrooke et laitier d'aciérie productrice d'acier inoxydable (AI). (Voir la page 97 pour l'explication des histogrammes)

CHAPITRE VI

RESULTATS DES ESSAIS D'EXTRACTION DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE*

VI.1- RESULTATS OBTENUS POUR LES PATES

VI.1.1- PATES AVEC LA FUMEE DE SILICE CONDENSEE

Nous avons déterminé la composition chimique de la solution interstitielle (SI) de pâtes contenant de la fumée de silice condensée (FSC) en deux étapes distinctes. Dans un premier temps, nous avons déterminé la composition chimique de la SI d'échantillons de pâte avec 0% et 10% de FSC et âgés entre 0 et 21 jours. Dans un deuxième temps, nous avons déterminé la composition chimique de la SI d'échantillons de pâte avec 0%, 5%, 10% et 15% de FSC et âgés de 6 mois. De plus, nous avons déterminé la teneur en alcalis des phases solides des échantillons de 180 jours après que la SI en ait été extraite.

*Consultez l'annexe B pour connaître les détails concernant ces essais.

Les figures 32 à 35 permettent de comparer l'évolution des concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^- de pâtes pures et de pâtes avec 10% de FSC. Les courbes démontrent que dans l'ensemble, les concentrations passent par une valeur maximale après quelques jours d'hydratation à 38 °C. Par la suite, les concentrations en ions Na^+ et K^+ des échantillons de contrôle, i.e. sans FSC, diminuent graduellement et remontent lentement jusqu'à 21 jours. A 180 jours, les concentrations en ions Na^+ et K^+ sont supérieures à celles mesurées à 21 jours.

L'évolution des concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^- des échantillons avec 10% de FSC est très différente de celle des échantillons de contrôle. En effet, malgré des valeurs initiales très similaires à celles des pâtes pures ainsi qu'une remontée vers une valeur maximale à environ 4 jours, les concentrations diminuent rapidement par la suite jusqu'à 21 jours. Les concentrations mesurées à 180 jours sont très similaires à celles mesurées à 21 jours, sauf pour la concentration en ions OH^- qui est moins élevée à 180 jours qu'à 21 jours.

Du côté des concentrations en ions OH^-, les échantillons avec 10% de FSC présentent une évolution très semblable à celle des ions Na^+ et K^+. Les échantillons de contrôle démontrent quant à eux une augmentation continue de leur concentration en ions OH^- de 0 à 6 mois. Toutefois, il est à noter que nous n'avons pas pu obtenir une

mesure à 4 jours, de sorte qu'il nous est impossible de dire si la concentration en ions OH^- des échantillons de contrôle passe par un maximum initial comme pour le cas des ions Na^+ et K^+.

Concernant les échantillons contenant 0%, 5%, 10% et 15% de FSC et âgés de 180 jours, les concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^- diminuent en fonction du pourcentage de FSC présent. De plus, cette diminution apparaît comme directement proportionnelle au niveau de remplacement du ciment par la FSC. La figure 46 montre le pourcentage de réduction des concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^- pour les différents pourcentages de FSC. Les pourcentages de réduction pour ces 3 ions varient entre 25% et 80%.

Les teneurs en Na et K mesurées sur les phases solides des échantillons ayant servi pour les extractions (teneurs mesurées après un broyage des échantillon, puis un rinçage de 24 heures dans de l'eau distillée et un séchage) indiquent que l'ajout de FSC augmente la quantité de Na et K au niveau des phases solides proportionnellement à la quantité de FSC présente (voir la figure 48). Cette augmentation varie entre 22% et 275%.

VI.1.2- PATES AVEC LE LAITIER SILICATE GRANULE

Nous avons déterminé la composition chimique de la solution

interstitielle (SI) de pâtes contenant 0%, 5%, 10% et 15% de laitier silicaté granulé (LSG) et âgées de 180 jours. Nous avons également déterminé la teneur en alcalis des phases solides des échantillons de pâte âgés de 180 jours après que la SI en ait été extraite.

La figure 37 permet de comparer les différentes concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^- de la SI des échantillons avec différents pourcentages de LSG. Dans l'ensemble, on ne remarque qu'une très légère diminution des concentrations de ces ions en fonction du pourcentage de LSG présent. Du côté des phases solides, on n'observe qu'une faible augmentation des teneurs en Na et K en fonction du pourcentage de LSG présent (voir la figure 39).

VI.2- RESULTATS OBTENUS POUR LES BETONS

VI.2.1- GRANULAT DE TROIS-RIVIERES

Nous avons déterminé la composition chimique de la SI d'échantillons de bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et contenant 0%, 5% et 10% de FSC et 0%, 5% et 10% de LSG et âgés de 180 jours.

Les figures 40 et 41 montrent respectivement les résultats obtenus pour les échantillons avec FSC et avec LSG. Un point

important qui ressort de ces figures est que dans les 2 cas, à 5% de remplacement, on remarque une augmentation des concentrations en ions Na^+ et K^+. Cependant, les concentrations en ions OH^- démontrent une réduction quelque soit le pourcentage d'ajout présent. A 10% de remplacement, dans les 2 cas, on remarque une diminution des concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^-; cette diminution étant nettement plus importante dans le cas des échantillons avec FSC qu'avec LSG. Aux figures 50 et 51, nous présentons ces résultats en termes de réduction ou d'augmentation en fonction du pourcentage d'ajout présent.

Au tableau 7, on remarquera que nous indiquons, en plus des concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^-, les concentrations en ions Ca^{2+} et Fe^{2+}. Dans l'ensemble, les résultats sont peu probants si ce n'est que les concentrations de ces ions dans la SI demeurent assez faibles.

VI.2.2- GRANULAT D'OTTAWA

Nous avons déterminé la composition chimique de la SI d'échantillons de bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et contenant 0%, 5%, et 10% de FSC et 0%, 5%, 10% et 15% de LSG et âgés de 180 jours. Aucune SI n'a pu être extraite de l'échantillon avec 15% de FSC et ce malgré un rapport E:C de 0.7.

Malgré le fait que le granulat d'Ottawa soit à priori très semblable au point de vue de sa nature pétrographique et de sa composition chimique au granulat de Trois-Rivières, les résultats obtenus dans ce cas-ci sont quelques peu différents (voir les figures 42 et 43). En effet, le LSG, à 5% et 10% de remplacement, n'a pratiquement pas d'effet sur la composition chimique de la SI en ce qui concerne les concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^-. Toutefois, à 15% de remplacement, une baisse nette de la concentration de ces ions est observée. A 5% et 10 % de remplacement, la FSC diminue les concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^- de la SI. Cette baisse est beaucoup plus marquée à 10% qu'à 5% de remplacement. Aux figures 52 et 53, nous présentons également ces résultats en termes de pourcentage de réduction des concentrations en fonction du pourcentage d'ajout présent.

Au tableau 7, nous indiquons, en plus des concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^-, les concentrations en ions Ca^{2+} et Fe^{2+}. Dans l'ensemble, les résultats sont peu probants si ce n'est que les concentrations de ces ions dans la SI demeurent assez faibles.

VI.2.3- GRANULAT DE SHERBROOKE

Nous avons déterminé la composition chimique de la SI d'échantillons de bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et

contenant 0% et 5% de FSC et 0%, 5%, 10% et 15% de LSG et âgés de 6 mois. Aucune SI n'a pu être extraite de l'échantillon avec 15% de FSC et ce malgré un rapport E:C de 0.7.

Les figures 44 et 45 montrent respectivement les résultats obtenus pour les échantillons avec FSC et LSG. Dans l'ensemble, le LSG démontre peu d'effet sur les concentrations en ions Na^+, K^+ et OH^- de même que la FSC à 5% de remplacement. Toutefois, à 10% de remplacement, on obtient une baisse nette des concentrations des mêmes ions. Aux figures 54 et 55, nous présentons également ces résultats en termes de pourcentage de réduction en fonction du pourcentage d'ajout présent.

VI.3- ANALYSE DES RESULTATS

Dans l'ensemble, nous remarquons que les effets de la FSC et du LSG sur la composition chimique de la SI sont plus marqués pour les pâtes que pour les bétons, ce qui est tout à fait normal si l'on considère l'effet de dilution des matériaux autres que le ciment, l'ajout et l'eau présents dans le béton. De plus, le rapport E:C des bétons est de 0.7 tandis que celui des pâtes est de 0.5, ce qui implique une plus grande dilution des alcalis dans le cas de nos bétons. Dans les deux cas, pâtes ou bétons, les tendances demeurent les mêmes, i.e., la FSC est plus efficace que le LSG pour un niveau

de remplacement donné.

Pour les 3 granulats, il apparaît certaines différences, notamment entre le granulat de Trois-Rivières et celui d'Ottawa qui sont pourtant pétrographiquement et chimiquement semblables. Toutes les autres variables étant les mêmes dans les 3 cas, il semble bien que le granulat lui-même interfère quelque peu dans la composition de la solution de la SI de bétons d'âges avancés en terme de maturité (cure scellée à 38 °C pendant 180 jours). Dans le cas d'un granulat calcaire, nous pourrions citer la réaction chimique qui intervient entre la SI à pH très élevé, et la calcite. Premièrement, il a été démontré que la calcite est en partie soluble dans une solution alcaline à pH très élevée et, de plus, dans une solution de NaOH 1N, il a été démontré que la dissolution de la calcite était suivie de la formation de portlandite (Durand, 1985).

En résumé, il est possible que le granulat lui-même, calcaire ou non, contribue en partie à la composition chimique de la SI des bétons. Leur degré de contribution dépend, à notre avis, de leur composition minéralogique et également de la taille des divers constituants ainsi que de leur porosité, ce qui est évidemment très variables d'un granulat à un autre. Dans le cas de granulats très semblables comme ceux d'Ottawa et de Trois-Rivières, il est plus difficile d'expliquer les différences observées.

En termes de valeurs absolues, les résultats que nous avons obtenus pour les pâtes sont comparables à ceux déjà obtenus par différents chercheurs (voir les chapitres II et III). En ce qui concerne les bétons, au moment de la rédaction de ce rapport, nous n'avons trouvé aucune publication faisant état de la concentration en ions Na^+, K^+ et OH^- de la SI de bétons.

TABLEAU 6: CONCENTRATIONS EN IONS DES PATES (SOLUTION INTERSTIELLE, A 6 MOIS)

ECHANTILLON	% AJOUT	Ca ppm	Na %	K %	Fe ppm	OH %	Li ppm
CTL-MOY	0	50	1.28	1.89	3.4	0.70	8.4
LSG	5	12	1.22	1.83	3.0	0.65	-
LSG	10	30	1.13	1.80	4.5	0.65	-
LSG	15	16	1.13	1.45	3.0	0.64	-
CTL-MOY	0	50	1.28	1.89	3.4	0.70	8.4
FSC	5	22	0.98	1.33	3.3	0.54	8.1
FSC	10	36	0.59	0.71	2.3	0.29	-
FSC	15	56	0.36	0.38	2.0	0.15	-
CTL-MOY	0.0	50	1.28	1.89	3.4	0.70	8.4
Li_2CO_3	0.5	62	1.34	1.77	3.6	0.70	8.3
Li_2CO_3	1.0	29	1.22	1.79	3.1	0.70	8.4

TABLEAU 7: CONCENTRATIONS EN IONS DES BETONS (SOLUTION INTERSTITIELLE, A 6 MOIS)

ECHANTILLON	% AJOUT	Ca ppm	Na %	K %	Fe ppm	OH %	Li ppm
CTL T-RIV.	0	199	0.87	0.81	8.4	0.41	-
LSG	5	70	1.03	0.94	6.2	0.37	-
LSG	10	148	0.78	0.58	7.6	0.32	-
CTL T-RIV.	0	199	0.87	0.81	8.4	0.41	-
FSC	5	369	0.92	0.94	28.6	0.37	-
FSC	10	18	0.50	0.48	3.0	0.26	-
CTL T-RIV.	0.0	199	0.87	0.81	8.4	0.41	-
Li_2CO_3	0.5	39	0.89	0.80	2.5	0.43	1.0
Li_2CO_3	1.0	293	0.88	0.85	21.0	0.42	1.2
ECHANTILLON	% AJOUT	Ca ppm	Na %	K %	Fe ppm	OH %	Li ppm
CTL SHERBROOKE	0	15	0.71	0.74	3.2	0.40	-
LSG	5	52	0.76	0.68	9.5	0.39	-
LSG	10	35	0.67	0.64	1.4	0.37	-
LSG	15	34	0.62	0.52	1.9	0.33	-
CTL SHERBROOKE	0	15	0.71	0.74	3.2	0.40	-
FSC	5	6	0.65	0.70	2.2	0.36	-
FSC	10	237	0.64	0.65	44.8	0.29	-
ECHANTILLON	% AJOUT	Ca ppm	Na %	K %	Fe ppm	OH %	Li ppm
CTL OTTAWA	0	144	0.64	0.66	22.6	0.37	-
LSG	5	52	0.65	0.56	1.3	0.31	-
LSG	10	51	0.66	0.55	1.0	0.33	-
LSG	15	9	0.55	0.42	3.1	0.22	-
CTL OTTAWA	0	144	0.64	0.66	22.6	0.37	-
FSC	5	337	0.57	0.60	16.6	0.30	-
FSC	10	24	0.46	0.44	1.2	0.21	-

TABLEAU 8: TENEURS EN Na ET K DES PHASES SOLIDES DES PATES (A 6 MOIS)

ECHANTILLON	% AJOUT	Na %	K %	Fe %	Li ppm
CTL-MOY	0	0.09	0.10	1.7	24
LSG	5	0.09	0.09	1.6	23
LSG	10	0.11	0.10	1.5	24
LSG	15	0.13	0.14	1.6	24
CTL-MOY	0	0.09	0.10	1.7	24
FSC	5	0.11	0.15	1.6	24
FSC	10	0.17	0.25	1.5	26
FSC	15	0.27	0.37	1.5	27

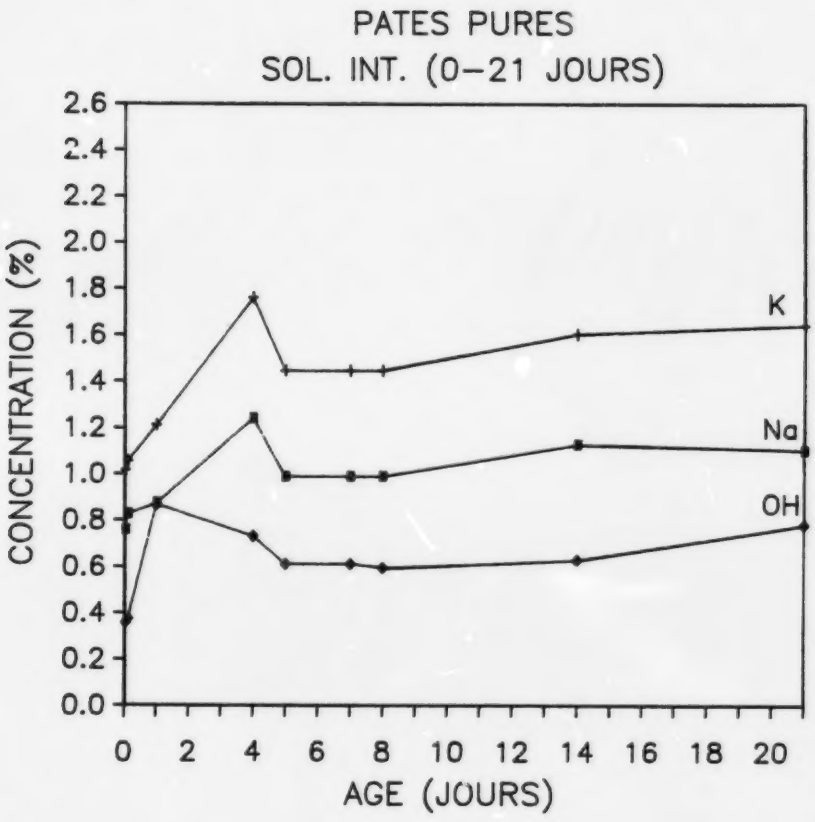


Fig. 32-Evolution de la concentration des ions pour les pâtes pures âgées de 0 à 21 jours.

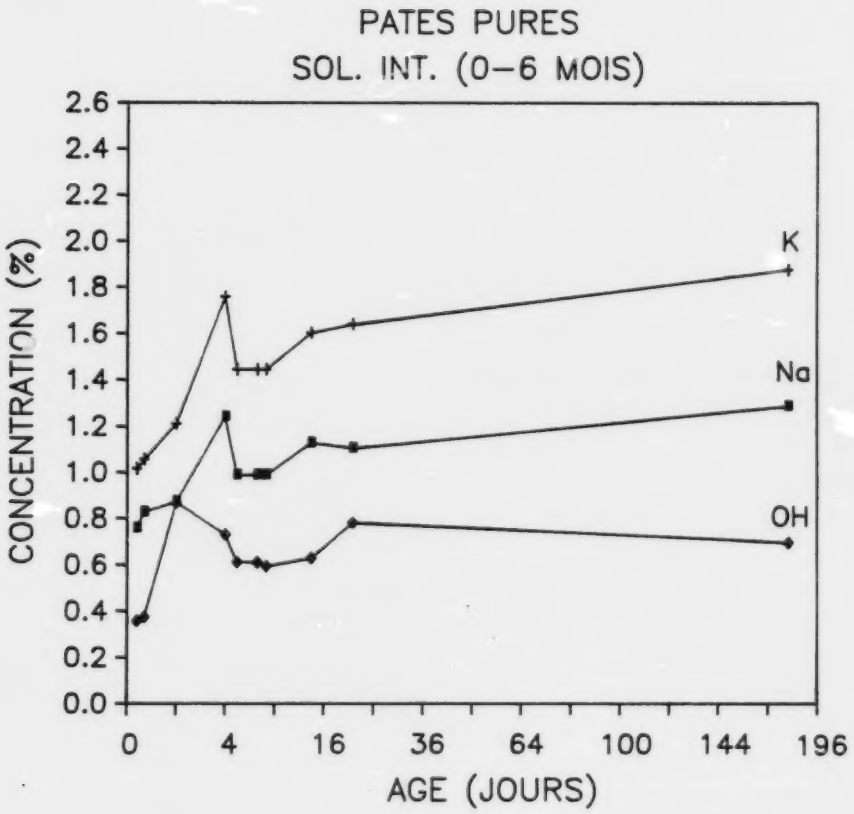


Fig. 33-Evolution de la concentration des ions pour les pâtes pures âgées de 0 à 6 mois.

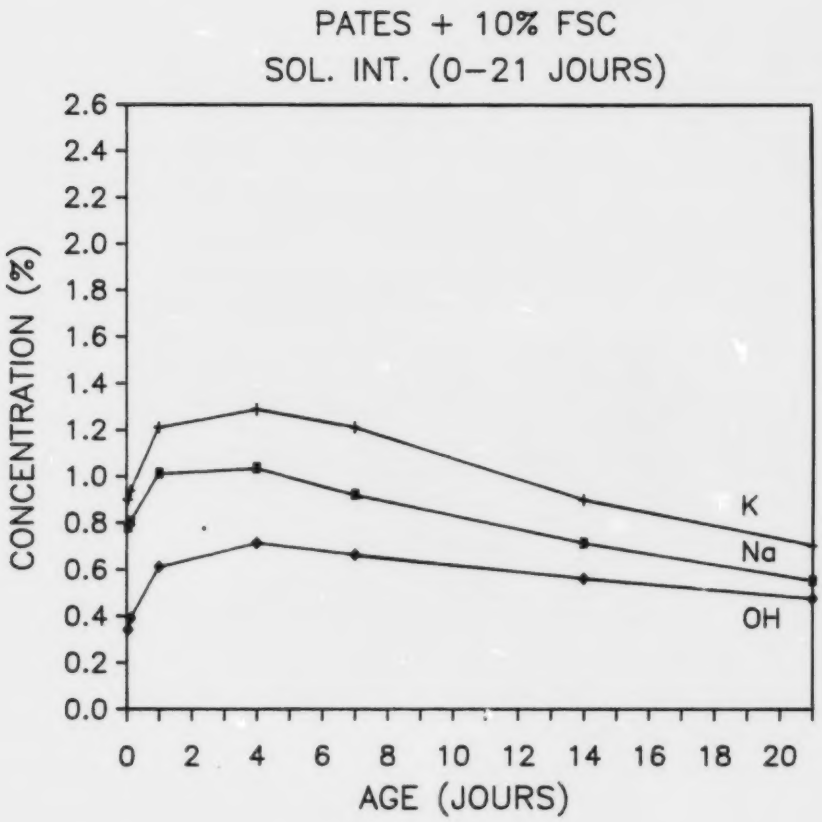


Fig. 34-Evolution de la concentration des ions pour les pâtes contenant 10% de fumée de silice condensée (FSC) et âgées de 0 à 21 jours.

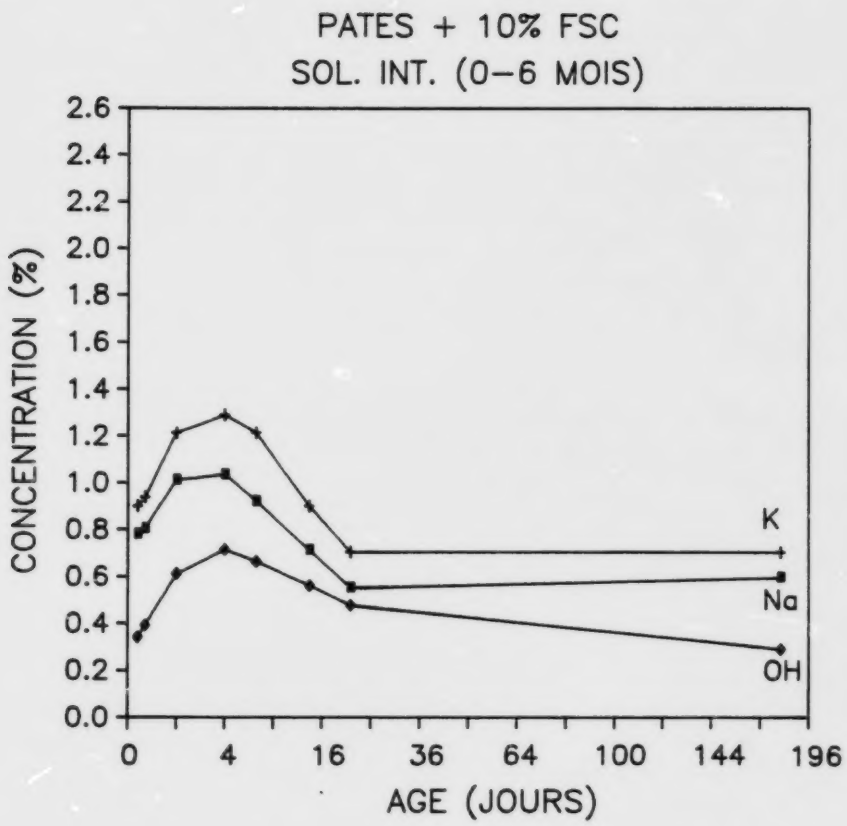


Fig. 35-Evolution de la concentration des ions pour les pâtes contenant 10% de FSC et âgées de 0 à 6 mois.

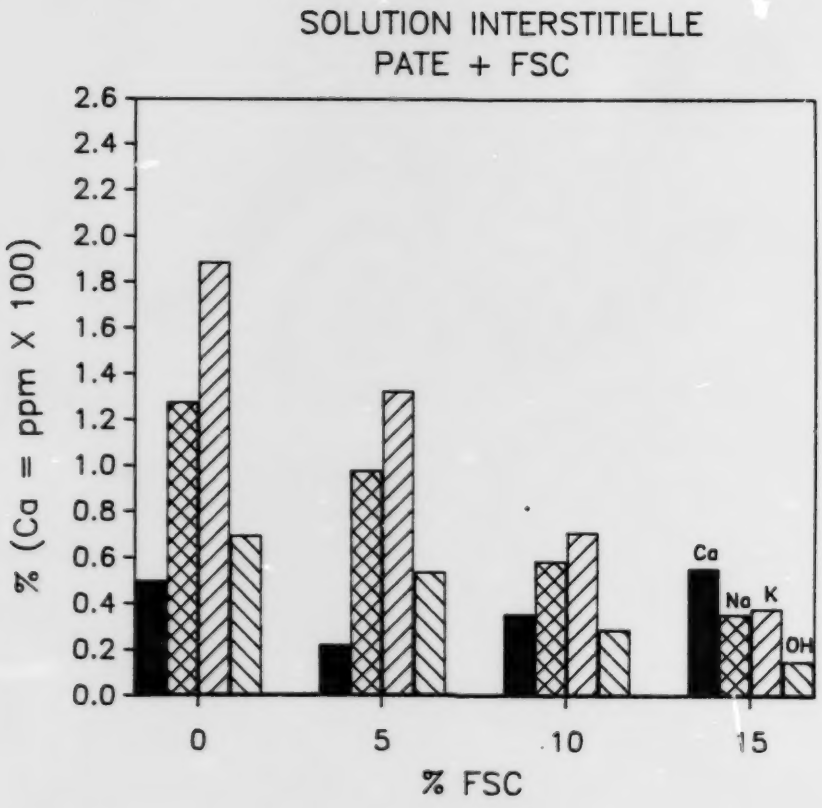


Fig. 36-Histogramme de la concentration des ions pour les pâtes contenant 5%, 10% et 15% de FSC et âgées de 6 mois.

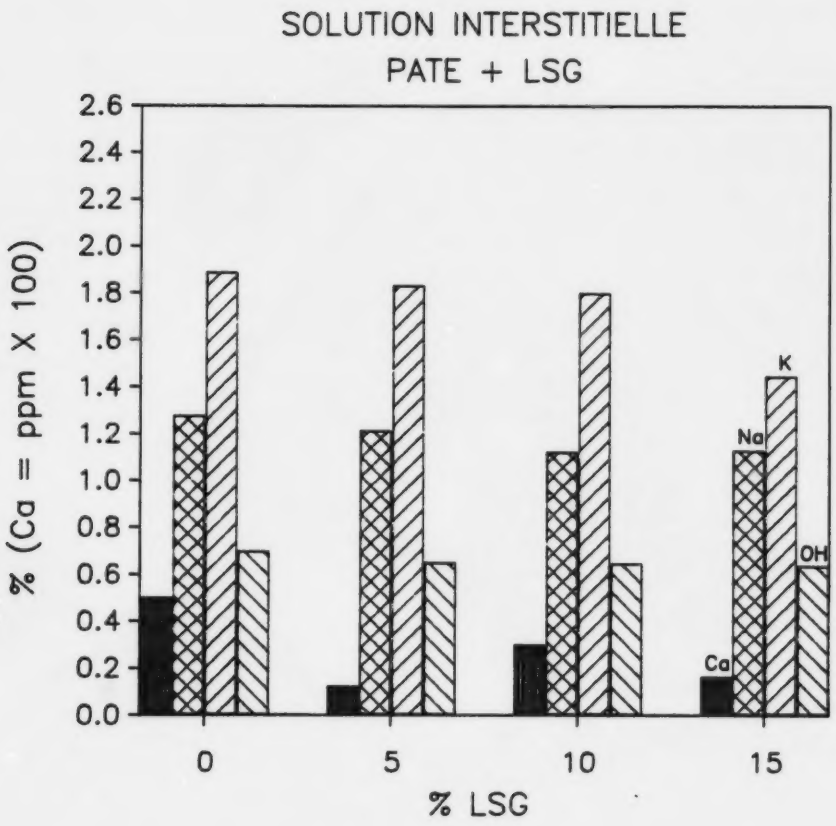


Fig. 37-Histogramme de la concentration des ions d'extraction de solution interstitielle pour les pâtes contenant 5%, 10% et 15% de laitier silicaté granulé et âgées de 6 mois.

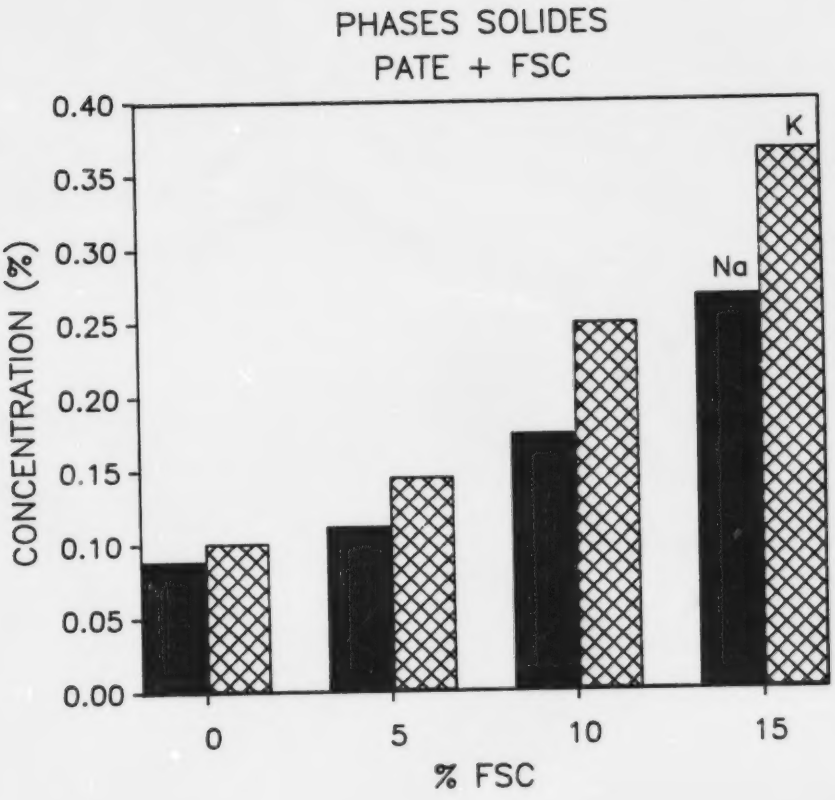


Fig. 38-Histogramme des teneurs en Na et K des phases solides des échantillons des essais d'extraction. (Pâte et 5%, 10% 15% de FSC, à 6 mois).

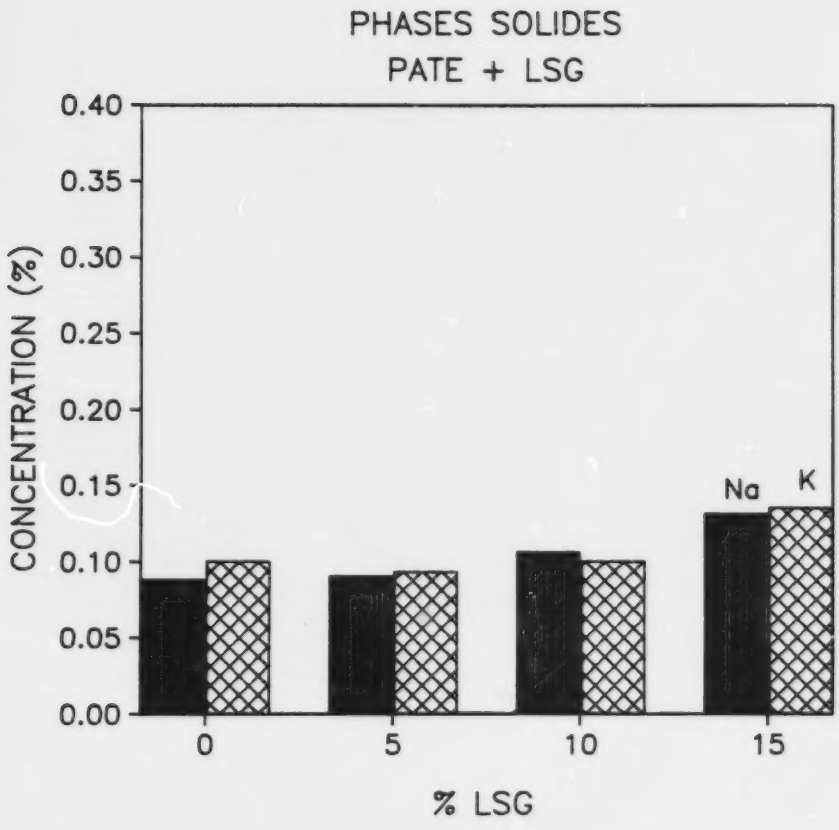


Fig. 39-Histogramme des teneurs en Na et K des phases solides des échantillons des essais d'extraction. (Pâte et 5%, 10% 15% de LSG, à 6 mois).

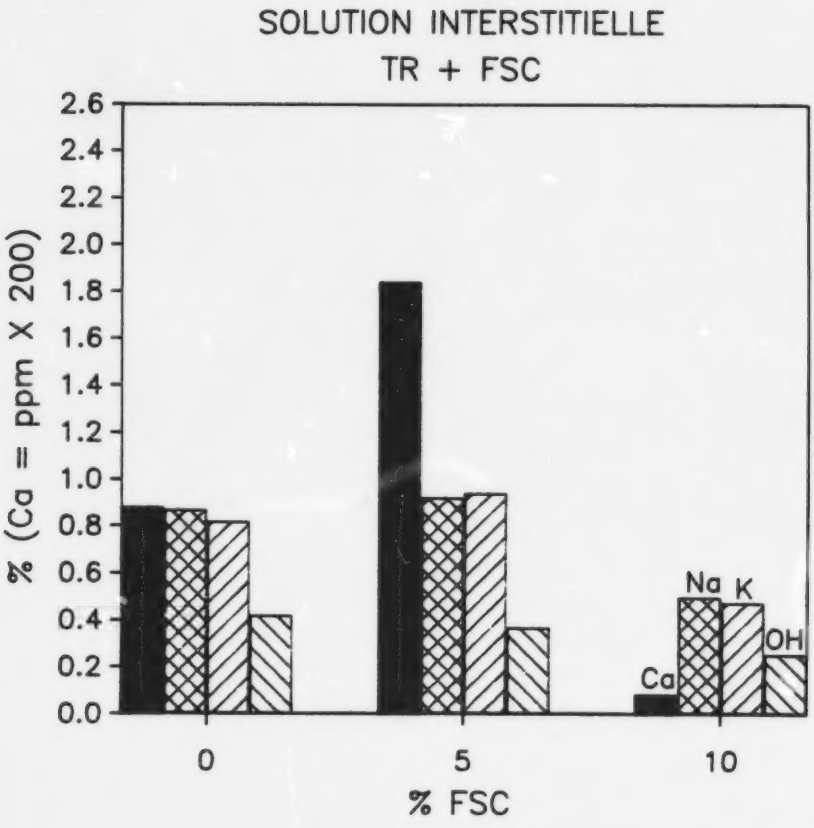


Fig. 40-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et contenant 5% et 10% de FSC. (A 6 mois)

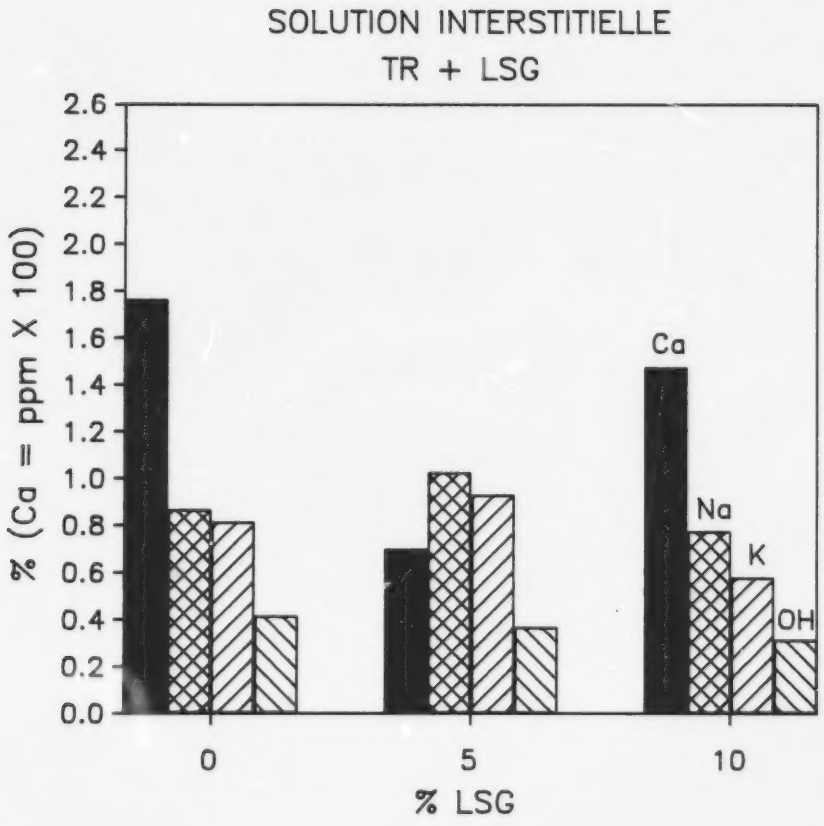


Fig. 41-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et contenant 5% et 10% de LSG.

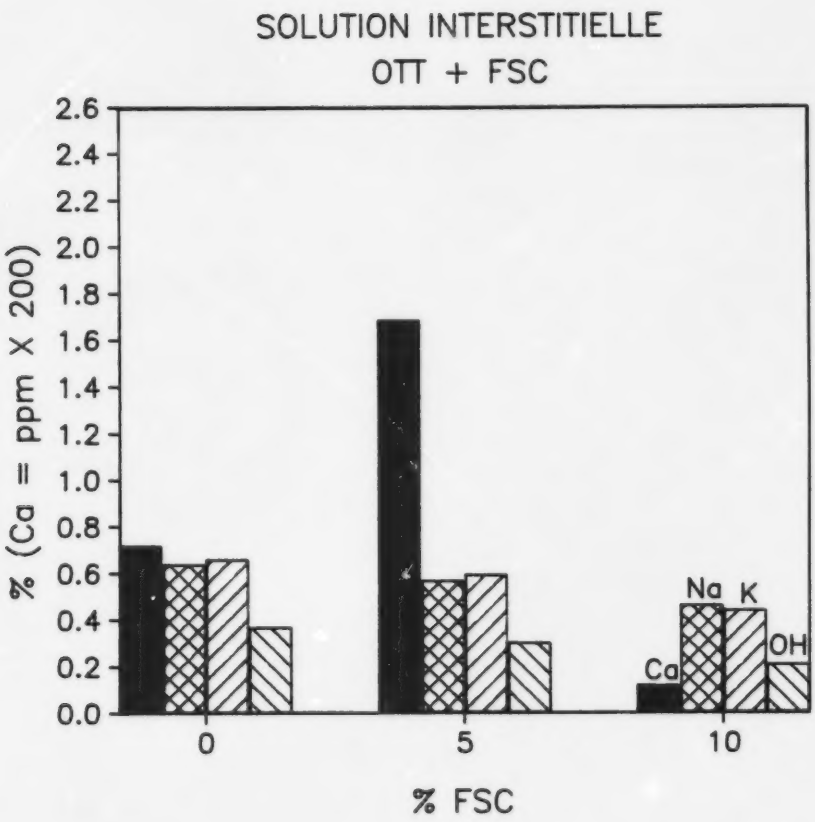


Fig. 42-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et contenant 5% et 10% de FSC. (A 6 mois)

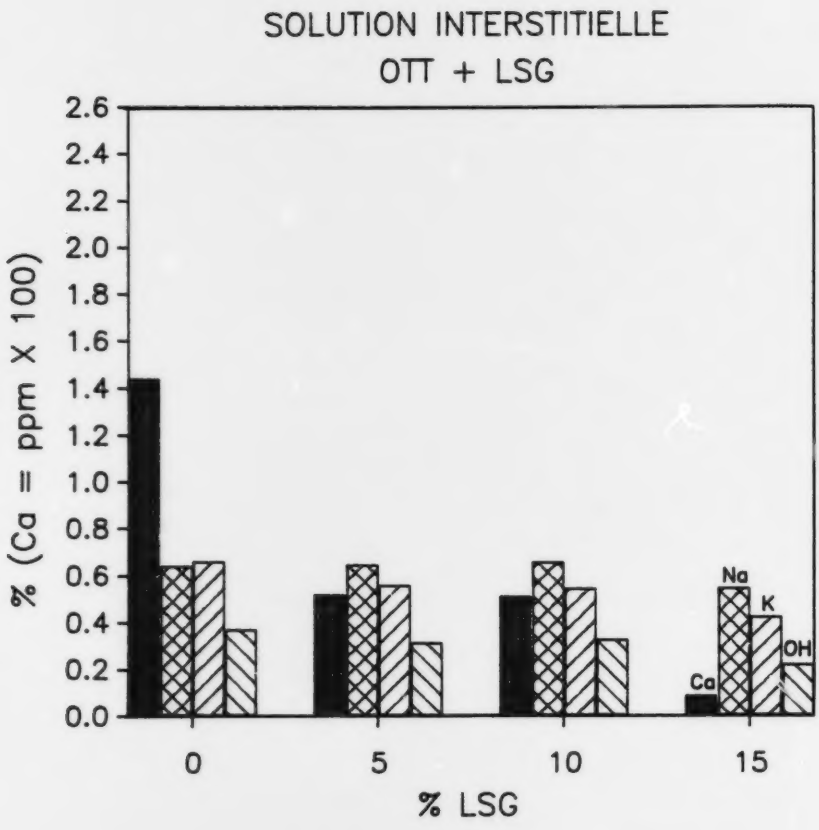


Fig. 43-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et contenant 5%, 10% et 15% de LSG. (A 6 mois)

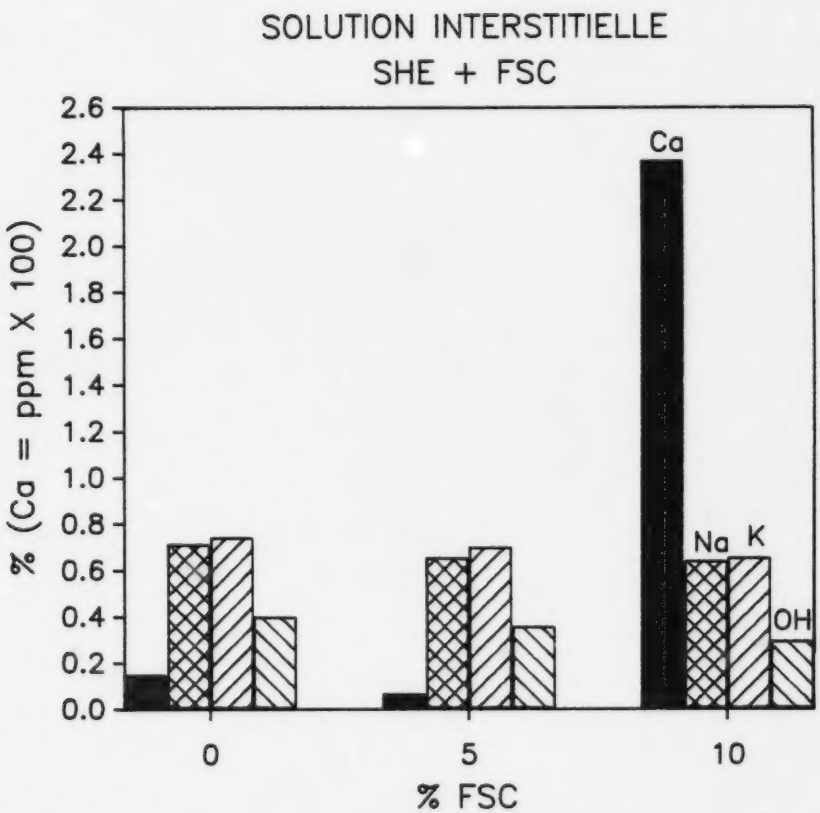


Fig. 44-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et contenant 5% et 10% de FSC (A 6 mois)

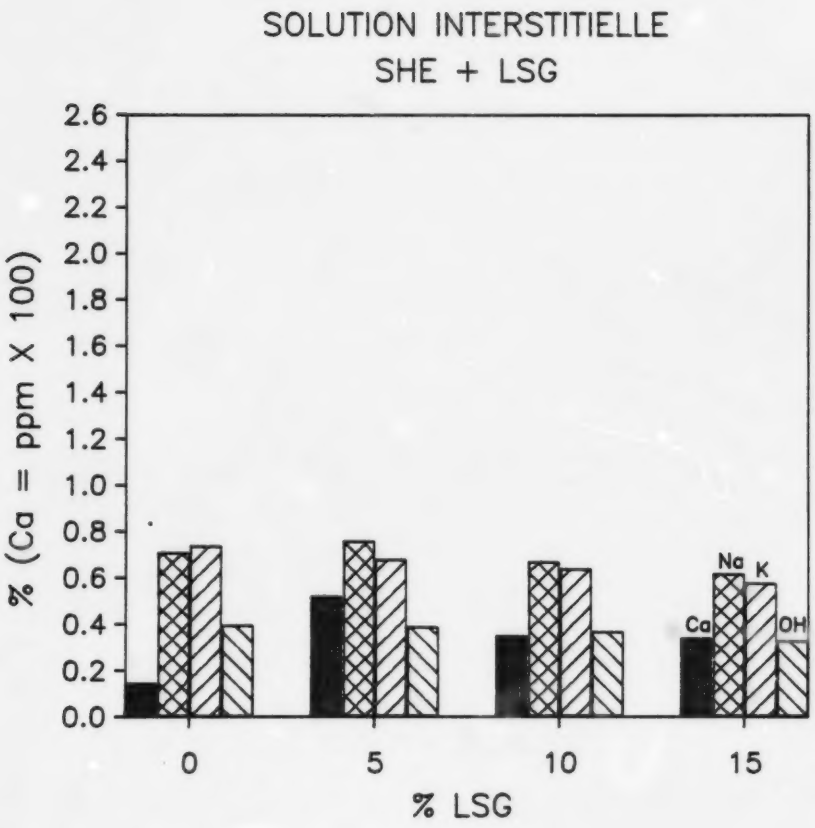


Fig. 45-Histogramme de la concentration des ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et contenant 5%, 10% et 15% de LSG. (A 6 mois)

EXPLICATION DES HISTOGRAMMES DES ESSAIS D'EXTRACTION DE SOLUTION INTERSTITIELLE (REDUCTION DES TENEURS)

Les valeurs (V) sont obtenues en calculant la différence entre la teneur de l'échantillon (A) et celle de l'échantillon de contrôle (B). Cette différence est divisée par la teneur de l'échantillon de contrôle et multipliée par 100. (Pour un âge donné et un ion donné)

V = (A-B/B) X 100 (% de réduction)

Dans le cas des teneurs des phases solides, puisque les teneurs des échantillons avec ajouts (A) sont en général supérieures à celle de l'échantillon de contrôle (B), les résultats sont donnés en termes de pourcentage d'augmentation des teneurs (V). (Pour un âge et un élément donné)

V = (B-A)/B X 100 (% d'augmentation)

Les valeurs négatives signifient qu'il y a eu une diminution des teneurs.

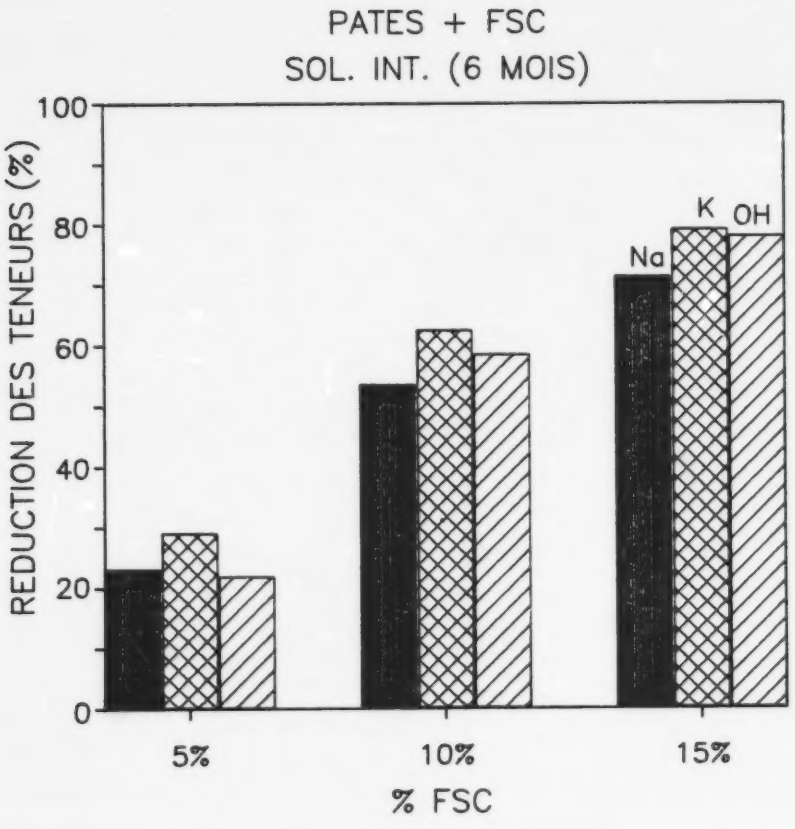


Fig. 46-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les pâtes avec 5%, 10% et 15% de FSC. (A 6 mois)

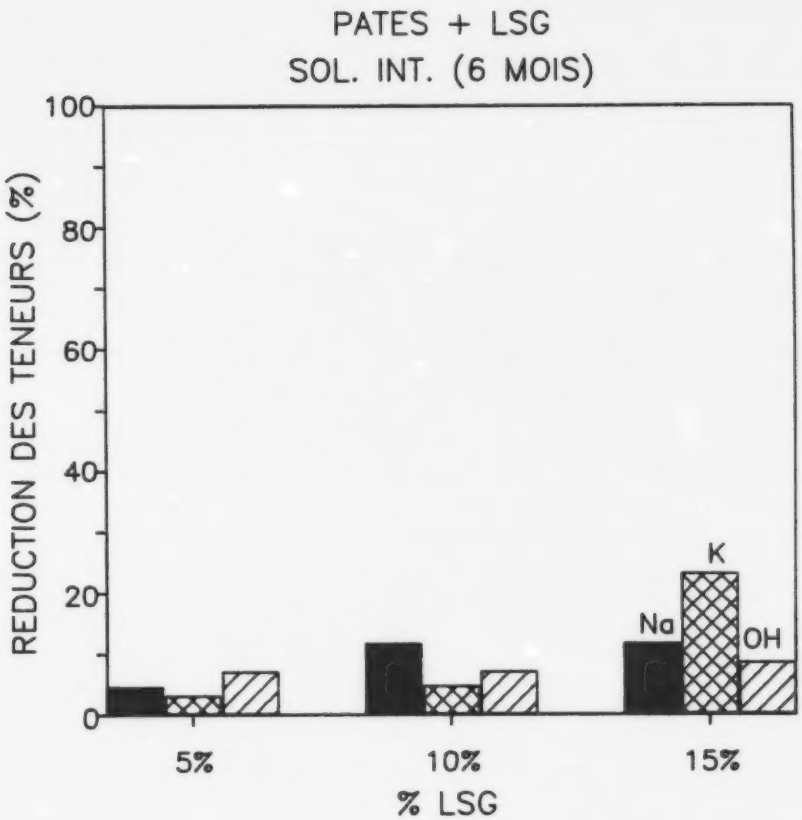


Fig. 47-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les pâtes avec 5%, 10% et 15% de LSG. (A 6 mois)

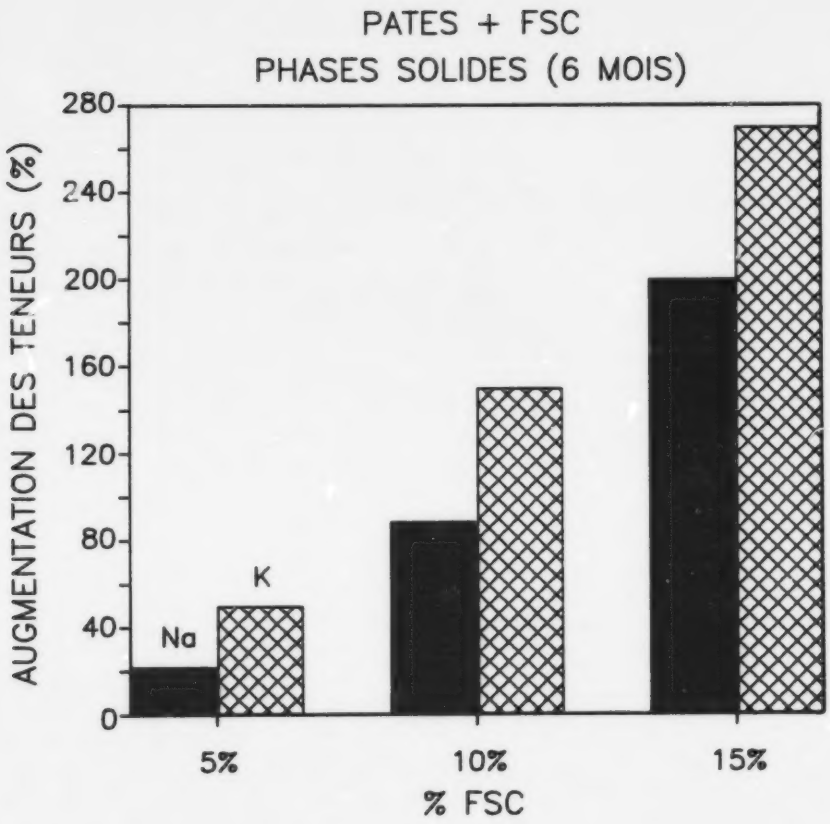


Fig. 48-Histogramme de l'augmentation des teneurs en Na et K pour les pâtes avec 5%, 10% et 15% de FSC. (A 6 mois)

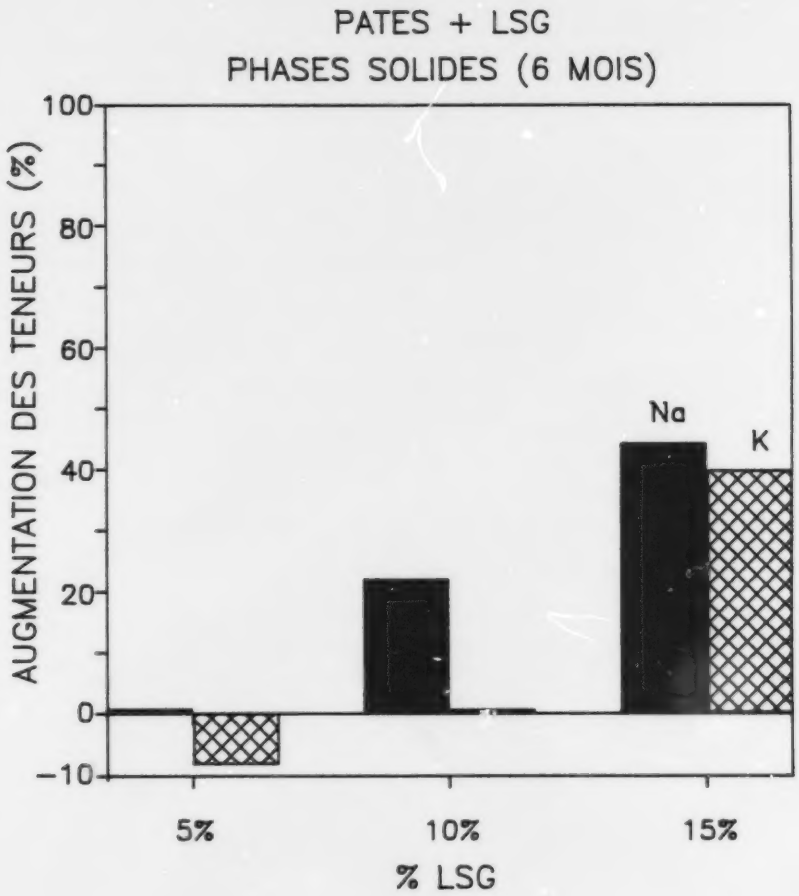


Fig. 49-Histogramme de l'augmentation des teneurs en Na et K pour les pâtes avec 5%, 10% et 15% de LSG. (A 6 mois)

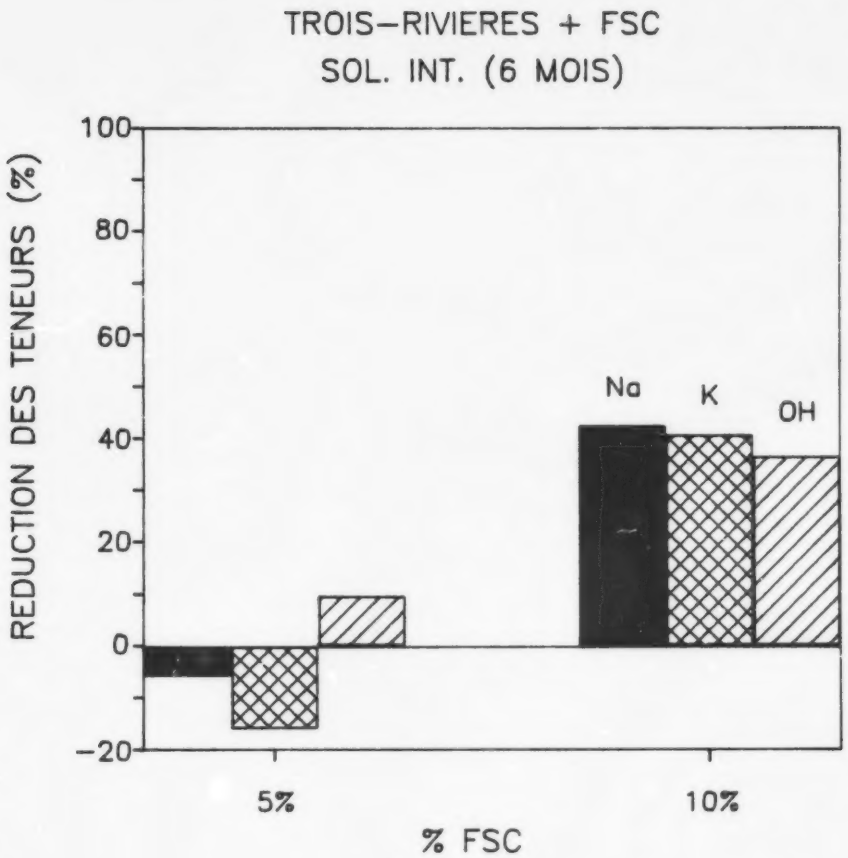


Fig. 50-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et 5% et 10% de FSC. (A 6 mois)

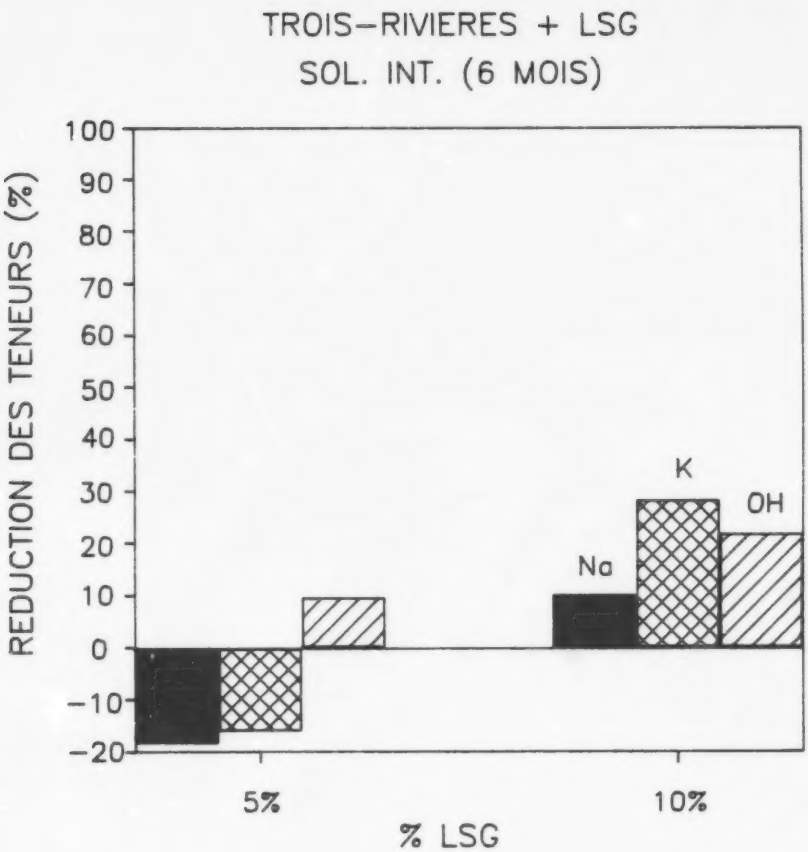


Fig. 51-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et 5% et 10% de LSG. (A 6 mois)

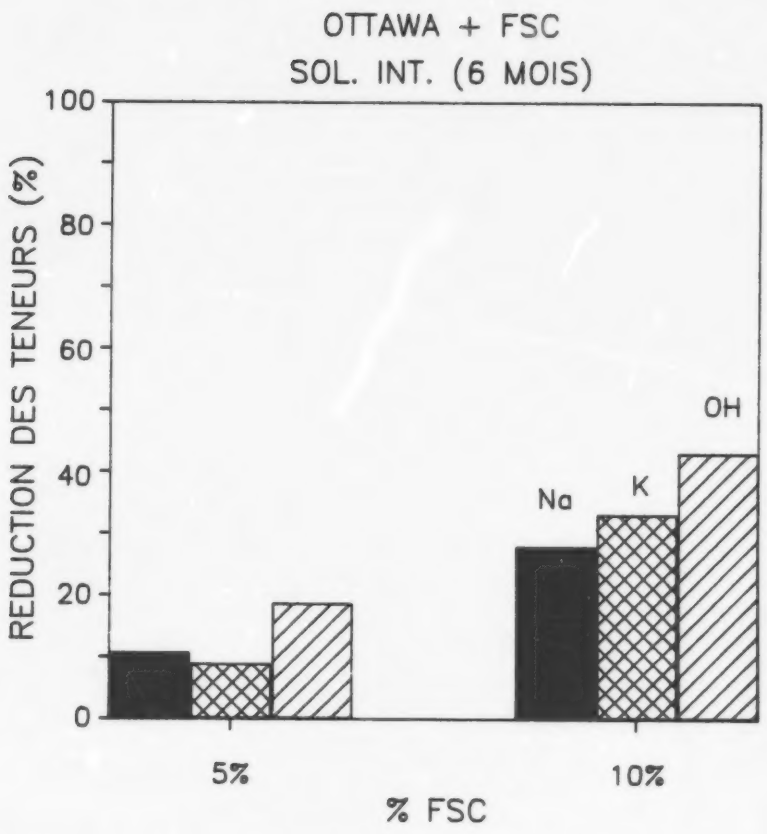


Fig. 52-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et 5% et 10% de FSC. (A 6 mois)

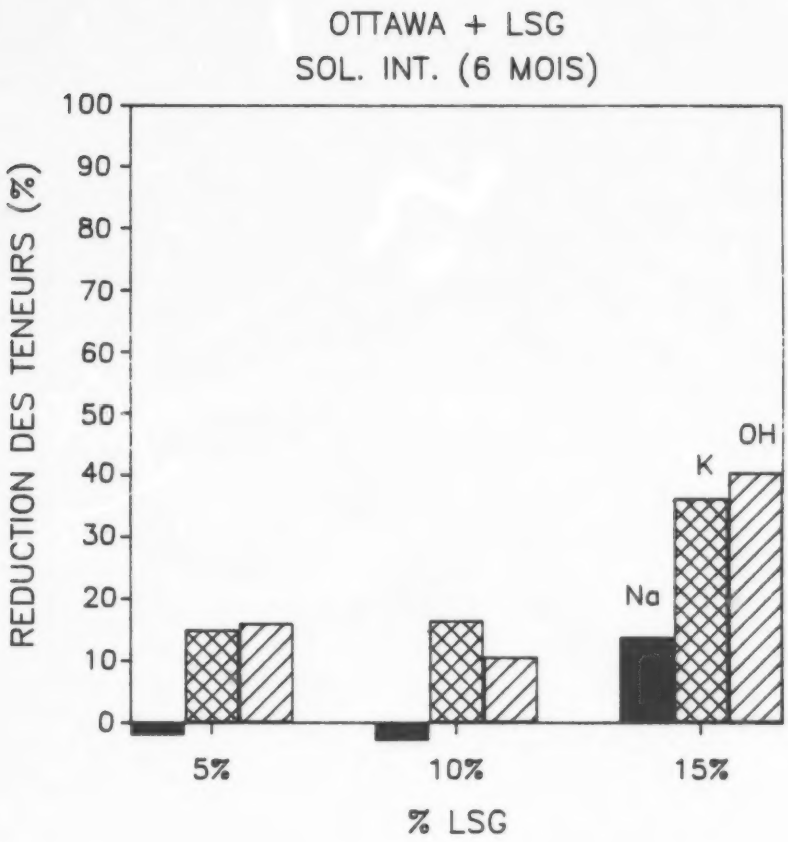


Fig. 53-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et 5%, 10% et 15% de LSG. (A 6 mois)

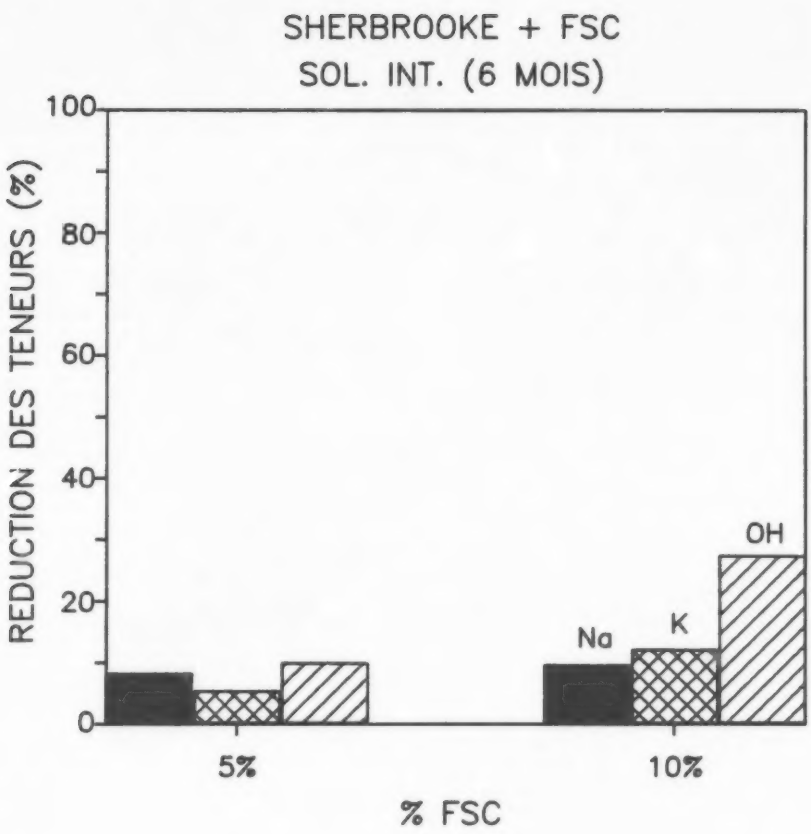


Fig. 54-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et 5% et 10% de FSC. (A 6 mois)

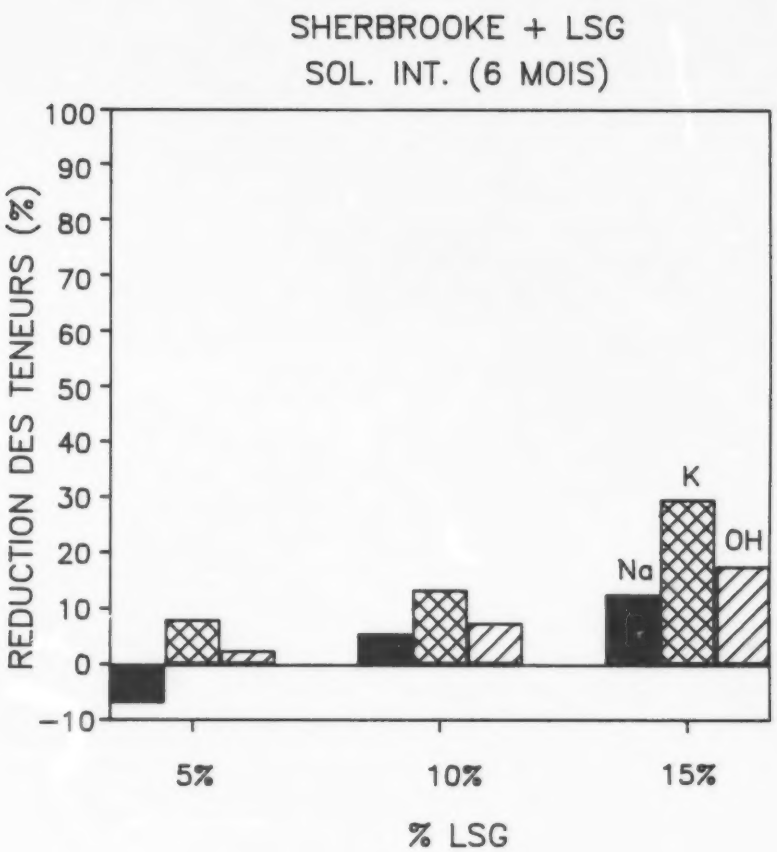


Fig. 55-Histogramme de réduction des concentrations en ions pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et 5%, 10% et 15% de LSG. (A 6 mois)

CHAPITRE VII

RESULTATS DES ESSAIS DE PERMEABILITE

Nous avons déterminé la perméabilité à l'azote d'échantillons de béton fabriqués à partir des mêmes mélanges que ceux qui ont servi à fabriquer les prismes de béton des essais d'expansion (voir le chapitre V). Nous fournissons les détails concernant les essais de perméabilité à l'annexe C, page 267. Rappelons ici que nous avons effectué les essais à partir de tranches de cylindre de 150 mm de diamètre par 80 mm d'épaisseur (2 tranches par échantillon). Les échantillons ont été soumis à l'essai de perméabilité à l'âge de 6 mois après avoir subi un séchage de 24 heures à 80 °C. Nous avons donc effectué ces mesures à partir d'échantillons qui ont subi une période de séchage prédéterminée mais ceci n'implique pas nécessairement que le pourcentage d'eau libre résiduelle dans les échantillons après séchage ait été constant. Nous présentons ici les résultats sur une base relative et nous n'avons pas l'intention de prétendre qu'il s'agit de mesures absolues de la perméabilité de nos échantillons de béton. Nous élaborerons d'avantage sur cette notion à la partie discussion.

Les résultats présentés ici sont la moyenne des valeurs obtenues pour chacune des 2 tranches de cylindre. L'écart type obtenu est de l'ordre de grandeur de 10%. La reproductibilité des mesures est de l'ordre de grandeur de 5% (même tranche soumis à un deuxième essai après 24 heures).

Les coefficients de perméabilité à l'azote augmentent en fonction de la pression appliquée et le Kc moyen, que nous indiquons dans notre tableau et nos histogrammes, représente un Kc pour une pression de 5.95 kg/cm^2. Ce phénomène a déjà été observé par différents chercheurs dont Neville (1983) et Mills (1987).

VII.1- LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES

Dans l'ensemble, les coefficients de perméabilité à l'azote obtenus pour les échantillons de béton fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières en combinaison avec la FSC, le LSG ou le Li_2CO_3 sont inférieurs à celui obtenu pour l'échantillon de contrôle (2 tranches de cylindre)(voir la figure 56). Les valeurs obtenues varient entre 3.3 X 10^{-8} cm/s à 1.9 X 10^{-9} cm/s. Pour le cas de la FSC, la perméabilité obtenue pour l'échantillon avec 5% de remplacement est légèrement inférieure à celle obtenue pour l'échantillon avec 10% de remplacement. Les meilleures réductions de perméabilité à 6 mois sont obtenues avec la FSC et le Li_2CO_3 (1% d'ajout dans ce cas).

VII.2- LE GRANULAT D'OTTAWA

Les meilleures réductions du coefficient de perméabilité pour les échantillons fabriqués avec le granulat d'Ottawa sont encore une fois obtenues avec la FSC. Cependant, les coefficients de perméabilité obtenus à 10% et 15% de remplacement sont supérieurs à celui obtenus à 5% de remplacement. Pour ce qui est du LSG, une bonne réduction du coefficient de perméabilité est obtenue à 10% de remplacement tandis qu'à 5% et 15% de remplacement, les coefficients obtenus sont légèrement supérieurs à celui de l'échantillon de contrôle (voir la figure 57).

VII.3- LE GRANULAT DE SHERBROOKE

La fourchette de résultats des coefficients de perméabilité des échantillons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke est beaucoup moins étendue que dans le cas des deux autres granulats et varie entre 2.4×10^{-9} et 1.0×10^{-9} cm/s. Les meilleures réductions du coefficient de perméabilité sont encore une fois obtenues avec la FSC où nous constatons qu'il y a peu de différence pour les différents pourcentages de remplacement. Dans l'ensemble, la présence d'ajout réduit le coefficient de perméabilité des échantillons (voir la

figure 58).

VII.4- DISCUSSION

Dans l'ensemble, les résultats obtenus démontrent que la présence d'ajout dans les bétons fabriqués pour cette étude réduit, ou augmente à peine dans certains cas, le coefficient de perméabilité de ces mêmes bétons. Nous notons que, dans l'ensemble, la FSC contribue à diminuer le coefficient de perméabilité des bétons qui en contiennent. Nous ne constatons pas une relation directe entre la réduction du coefficient de perméabilité et le pourcentage de FSC ou de LSG présent dans les échantillons. Nos résultats ne sont toutefois pas en désaccord avec les résultats de Nagataki et Ujike (1986) qui ont obtenu des coefficients de perméabilité à l'air de mortier qui n'augmentent pas nécessairement en fonction du pourcentage de FSC dans les échantillons. Si nous avions mesuré nos perméabilités à l'aide d'un perméamètre à eau, il est possible que dans ce cas nous aurions obtenu une diminution du coefficient de perméabilité en fonction du pourcentage de FSC dans les échantillons (Sellevold, 1987).

Nous sommes conscients que les mesures effectuées ont été faites à partir d'un nombre restreint d'échantillons et qu'en plus, les coefficients de perméabilité mesurés ont été obtenus à partir

d'échantillons à l'intérieur desquels la réaction alcalis-granulats s'est déjà manifestée par la formation de produit de réaction calco-silico-alcalins, par la provocation de l'expansion des échantillons et également d'une certaine microfissuration (voir le chapitre XI).

Nous avons donc mesuré des coefficients de perméabilité sur des bétons matures et non pas sur des bétons jeunes où aucune manifestation de la réaction ne s'est encore produite.

Nous reprendrons plus loin au chapitre XII la discussion concernant la relation entre les résultats des essais d'expansion et les résultats des essais de perméabilité à l'azote.

TABLEAU 9: COEFFICIENTS DE PERMEABILITE DES BETONS (A 6 MOIS)

ECHANTILLON	Kc à P=4.9 kg/cm² (cm/s)	Kc à P=5.6 kg/cm² (cm/s)	Kc à P=6.3 kg/cm² (cm/s)	Kc à P=7.0 kg/cm² (cm/s)	Kc* Moy. (cm/s)
TR-CONTROLE	$2.9E^{-8}$	$3.2E^{-8}$	$3.4E^{-8}$	$3.6E^{-8}$	$3.3E^{-8}$
TR-5% LSG	$3.3E^{-8}$	$3.5E^{-8}$	$3.6E^{-8}$	$3.8E^{-8}$	$3.5E^{-8}$
TR-10% LSG	$9.4E^{-9}$	$9.7E^{-9}$	$1.0E^{-8}$	$1.1E^{-8}$	$9.9E^{-9}$
TR-5% FSC	$1.7E^{-9}$	$1.8E^{-9}$	$2.0E^{-9}$	$2.1E^{-9}$	$1.9E^{-9}$
TR-10% FSC	$3.4E^{-9}$	$3.5E^{-9}$	$3.6E^{-9}$	$3.6E^{-9}$	$3.5E^{-9}$
TR-0.5% Li	$1.7E^{-8}$	$1.8E^{-8}$	$1.8E^{-8}$	$1.9E^{-8}$	$1.8E^{-8}$
TR-1.0% Li	$1.8E^{-9}$	$1.9E^{-9}$	$2.0E^{-9}$	$2.2E^{-9}$	$2.0E^{-9}$
OT-CONTROLE	$3.6E^{-9}$	$4.0E^{-9}$	$4.4E^{-9}$	$4.8E^{-9}$	$4.2E^{-9}$
OT-5% LSG	$3.8E^{-9}$	$4.2E^{-9}$	$4.3E^{-9}$	$4.7E^{-9}$	$4.2E^{-9}$
OT-10% LSG	$7.1E^{-10}$	$9.0E^{-10}$	$1.1E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	$1.0E^{-9}$
OT-15% LSG	$4.8E^{-9}$	$5.1E^{-9}$	$5.3E^{-9}$	$5.5E^{-9}$	$5.2E^{-9}$
OT-5% FSC	$1.1E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	$1.4E^{-9}$	$1.5E^{-9}$	$1.3E^{-9}$
OT-10% FSC	$2.3E^{-9}$	$2.5E^{-9}$	$2.7E^{-9}$	$2.9E^{-9}$	$2.6E^{-9}$
OT-15% FSC	$2.0E^{-9}$	$2.1E^{-9}$	$2.3E^{-9}$	$2.5E^{-9}$	$2.2E^{-9}$
SH-CONTROLE	$2.3E^{-9}$	$2.4E^{-9}$	$2.4E^{-9}$	$2.5E^{-9}$	$2.4E^{-9}$
SH-5% LSG	$1.4E^{-9}$	$1.5E^{-9}$	$1.6E^{-9}$	$1.7E^{-9}$	$1.5E^{-9}$
SH-10% LSG	$1.4E^{-9}$	$1.6E^{-9}$	$1.7E^{-9}$	$1.8E^{-9}$	$1.6E^{-9}$
SH-15% LSG	$1.4E^{-9}$	$1.5E^{-9}$	$1.6E^{-9}$	$1.7E^{-9}$	$1.5E^{-9}$
SH-5% FSC	$1.2E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	$1.4E^{-9}$	$1.3E^{-9}$
SH-10% FSC	$9.0E^{-10}$	$9.4E^{-10}$	$1.0E^{-9}$	$1.1E^{-9}$	$9.9E^{-10}$
SH-15% FSC	$9.1E^{-10}$	$1.0E^{-9}$	$1.1E^{-9}$	$1.2E^{-9}$	$1.0E^{-9}$

*Kc: Coefficient de perméabilité

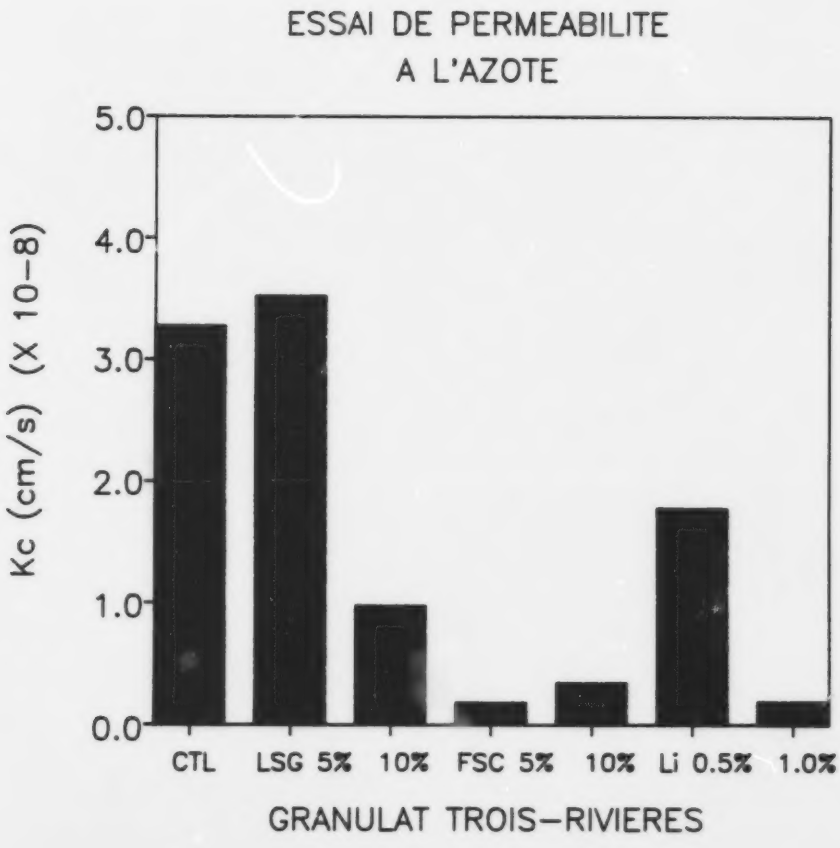


Fig. 56-Histogramme de réduction de perméabilité à l'azote pour les bétons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières et des ajouts de LSG, FSC et Li_2CO_3. (A 6 mois)

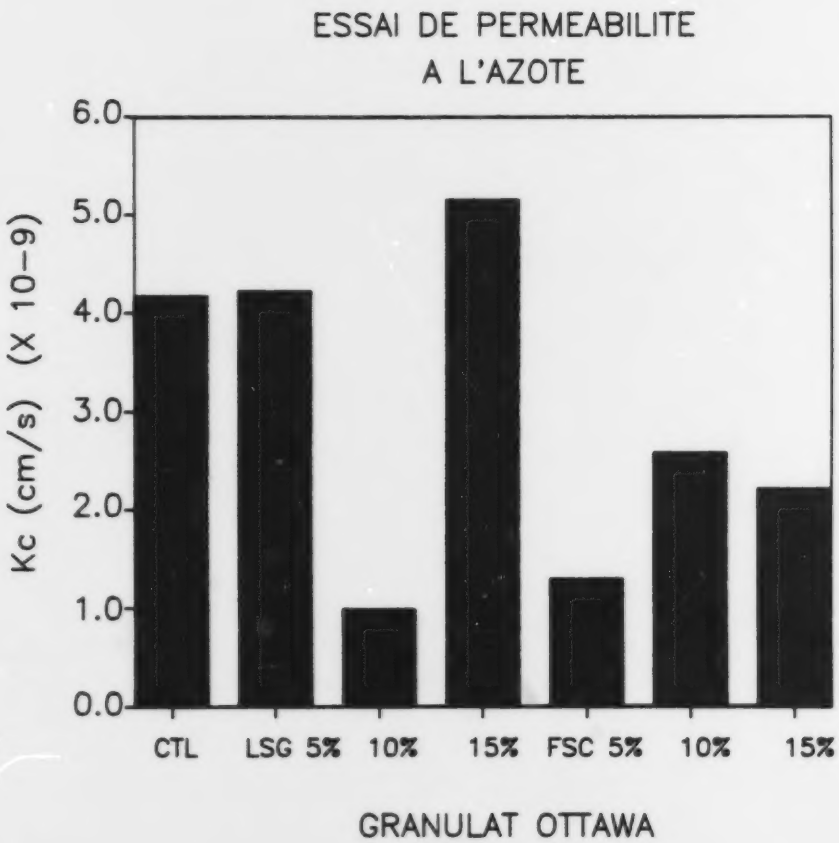


Fig. 57-Histogramme des perméabilités à l'azote pour les bétons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et des ajouts de LSG et de FSC. (A 6 mois)

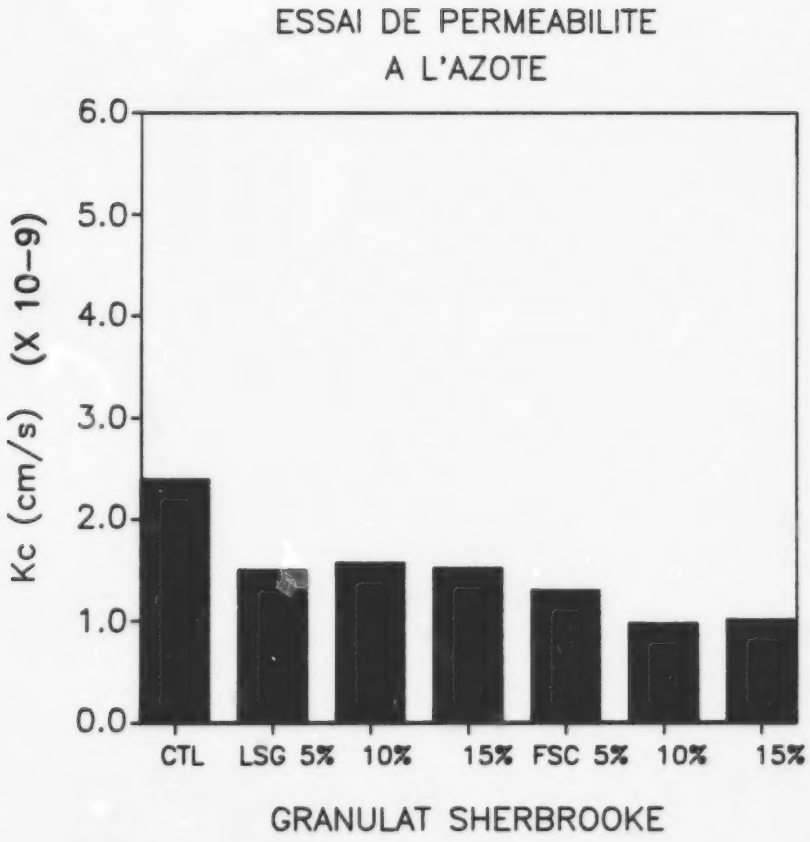


Fig. 58-Histogramme des perméabilités à l'azote pour les bétons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke et des ajouts de LSG et de FSC. (A 6 mois)

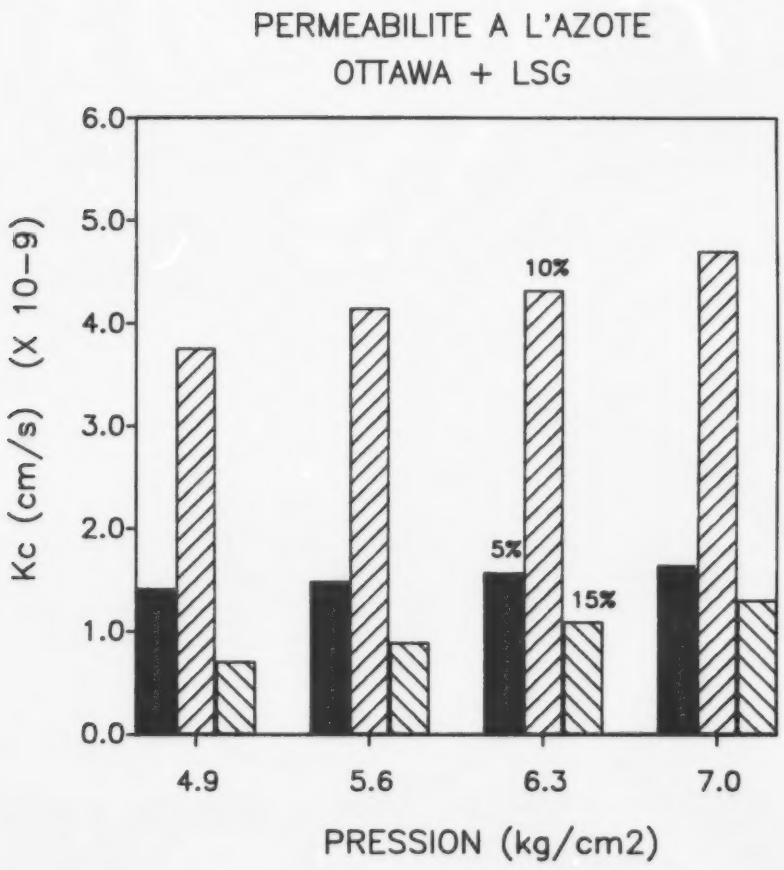


Fig. 59-Histogramme montrant la variation du coefficient de perméabilité à l'azote mesuré en fonction du gradient de pression. Dans ce cas-ci, il s'agit d'un échantillon de béton fabriqué avec le granulat d'Ottawa et le LSG.

CHAPITRE VIII

RESULTATS DES ANALYSES THERMOGRAVIMETRIQUES

Nous avons effectué des essais de détermination des teneurs en $Ca(OH)_2$ par le biais d'analyses thermogravimétriques effectuées sur des pâtes et des bétons âgées de 6 mois. Les détails concernant ces essais sont donnés à l'annexe D.

VIII.1- LES PATES

Dans le cas de la FSC et dans le cas du LSG, le pourcentage de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ est fonction du pourcentage d'ajout. Aucun des deux ajouts, aux pourcentages de remplacement utilisés, n'élimine complètement le $Ca(OH)_2$. Les pourcentages de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ varient entre 3% et 64% pour les deux ajouts utilisés. La teneur en $Ca(OH)_2$ de l'échantillon de contrôle est de 20.2% ce qui est conforme avec les résultats déjà observés lors de travaux antérieurs (Durand, 1985) (voir la figure 60).

VIII.2- LES BETONS

VIII.2.1- LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES

Les teneurs en $Ca(OH)_2$ mesurées à partir d'échantillons de béton fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières varient entre 1.2% et 2.7%. Le pourcentage de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ est fonction du pourcentage d'ajout utilisé. Ces pourcentages de réduction varient entre 15% et 56%. C'est la FSC, à 10% de remplacement, qui permet d'obtenir la meilleure réduction avec 56% (soit une teneur absolue de 1.2% de $Ca(OH)_2$ comparativement à une teneur absolue de 2.7% pour l'échantillon de contrôle) (voir la figure 62).

VIII.2.2- LE GRANULAT D'OTTAWA

Les teneurs en $Ca(OH)_2$ mesurées à partir d'échantillons de béton fabriqués avec le granulat d'Ottawa varient entre 0.9% et 2.4%. Dans l'ensemble, le pourcentage de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ est fonction du pourcentage d'ajout utilisé, sauf pour l'échantillon avec 5% de LSG où nous avons mesuré une teneur en $Ca(OH)_2$ légèrement supérieure à celle de l'échantillon de contrôle. Ces pourcentages de réduction varient entre -9% et 59%. C'est la FSC, à 15% de remplacement, qui permet d'obtenir la meilleure réduction avec 59% (soit une teneur absolue de 0.9% de $Ca(OH)_2$ comparativement à une

teneur absolue de 2.2% pour l'échantillon de contrôle) (voir la figure 62).

VIII.2.3- LE GRANULAT DE SHERBROOKE

Les teneurs en $Ca(OH)_2$ mesurées à partir d'échantillons de béton fabriqués avec le granulat de Sherbrooke varient entre 1.1% et 2.9%. Dans l'ensemble, le pourcentage de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ est fonction du pourcentage d'ajout utilisé, sauf pour l'échantillon avec 5% de LSG où nous avons mesuré une teneur en $Ca(OH)_2$ légèrement supérieure à celle de l'échantillon de contrôle. Ces pourcentages de réduction varient entre -4% et 61%. C'est la FSC, à 15% de remplacement, qui permet d'obtenir la meilleure réduction avec 61% (soit une teneur absolue de 1.1% de $Ca(OH)_2$ comparativement à une teneur absolue de 2.8% pour l'échantillon de contrôle) (voir la figure 64).

Au chapitre XII, nous discuterons des relations entre les résultats obtenus ici et les différents résultats obtenus à partir des autres essais.

TABLEAU 10: TENEURS EN $Ca(OH)_2$ DES PATES

(A 6 MOIS)

ECHANTILLON	%	% $Ca(OH)_2$ brut	% $CaCO_3$	% $Ca(OH)_2$ corrigé	% RED.
CTL	0	19.2	1.3	20.2	0
FSC	5	12.9	2.4	14.7	27
FSC	10	9.6	2.6	11.6	43
FSC	15	5.3	2.7	7.3	64
CTL	0	19.2	1.3	20.2	0
LSG	5	18.1	2.0	19.6	3
LSG	10	15.2	2.4	17.0	16
LSG	15	14.3	2.3	16.0	21

TABLEAU 11: TENEURS EN $Ca(OH)_2$ DES BETONS

(A 6 MOIS)

ECHANTILLON	%	% $Ca(OH)_2$	% RED.
TR-CTL	0	2.7	0
TR-FSC	5	1.6	41
TR-FSC	10	1.2	56
TR-CTL	0	2.7	0
TR-LSG	5	2.3	15
TR-LSG	10	2.2	19
SHE-CTL	0	2.8	0
SHE-FSC	5	2.4	14
SHE-FSC	10	1.7	39
SHE-FSC	15	1.1	61
SHE-CTL	0	2.8	0
SHE-LSG	5	2.9	-4
SHE-LSG	10	2.6	7
SHE-LSG	15	2.3	18
OTT-CTL	0	2.2	0
OTT-FSC	5	1.6	27
OTT-FSC	10	1.1	50
OTT-FSC	15	0.9	59
OTT-CTL	0	2.2	0
OTT-LSG	5	2.4	-9
OTT-LSG	10	2.0	9
OTT-LSG	15	1.9	14

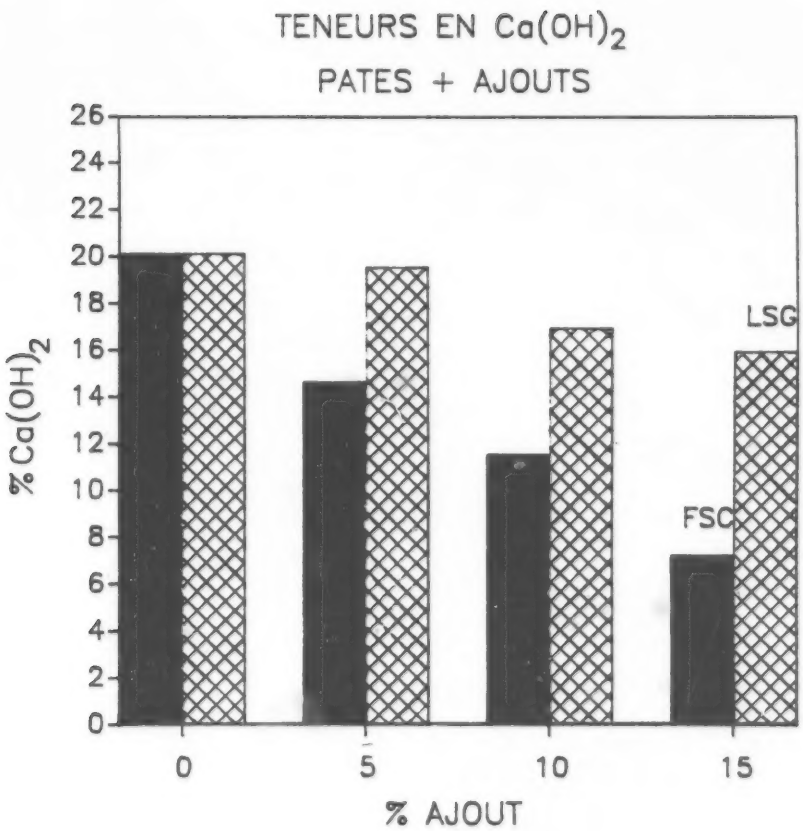


Fig. 60-Histogramme des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Pâtes avec ajouts, à 6 mois)

EXPLICATION DE L'HISTOGRAMME DES ESSAIS DE DETERMINATION DES TENEUR EN $Ca(OH)_2$ (REDUCTION DES TENEURS)

Les valeurs (V) sont obtenues en calculant la différence entre la teneur de l'échantillon (A) et celle de l'échantillon de contrôle (B). Cette différence est divisée par la teneur de l'échantillon de contrôle et multipliée par 100. (Pour un âge donné et un ion donné)

V = (A-B/B) X 100 (% de réduction)

Une valeur négative signifie qu'il y a eu augmentation de la teneur.

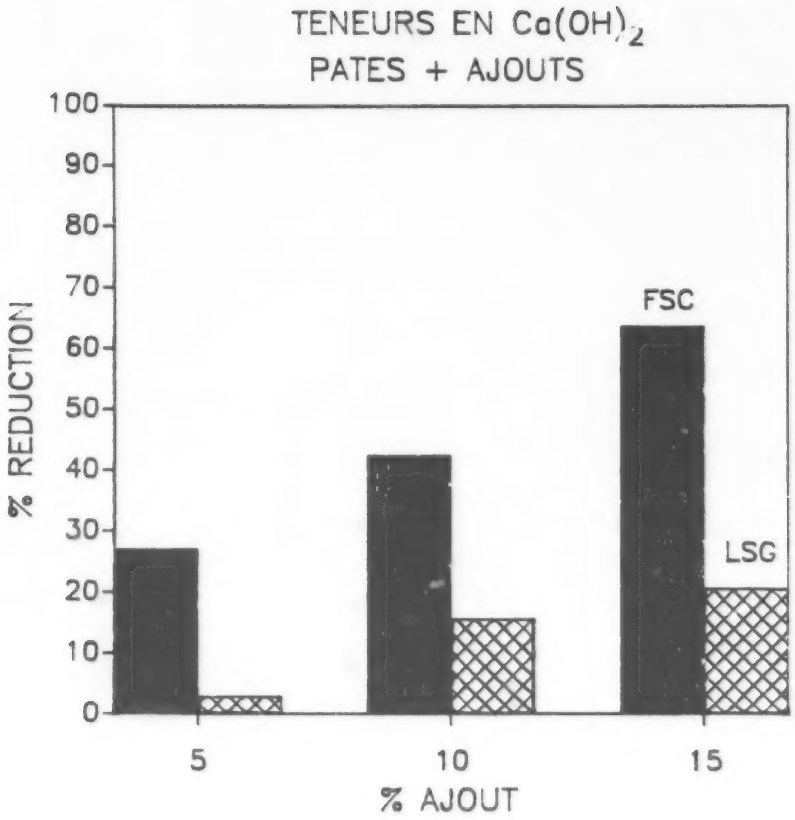


Fig. 61-Histogramme de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Pâtes avec ajouts, à 6 mois)

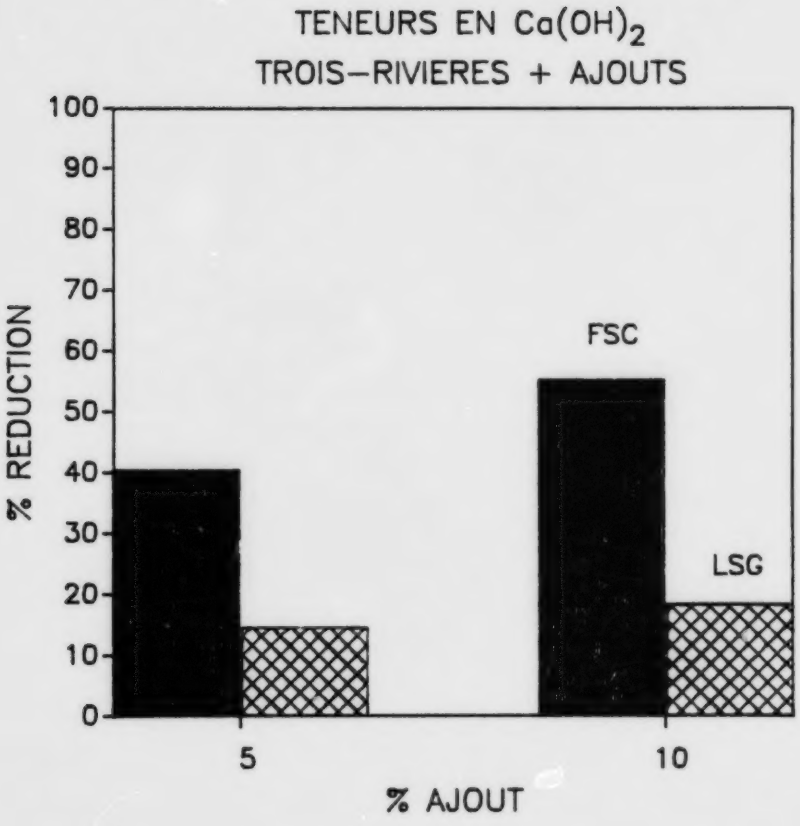


Fig. 62-Histogramme de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Bétons fabriqués avec le granulats de Trois-Rivières et avec ajouts, à 6 mois)

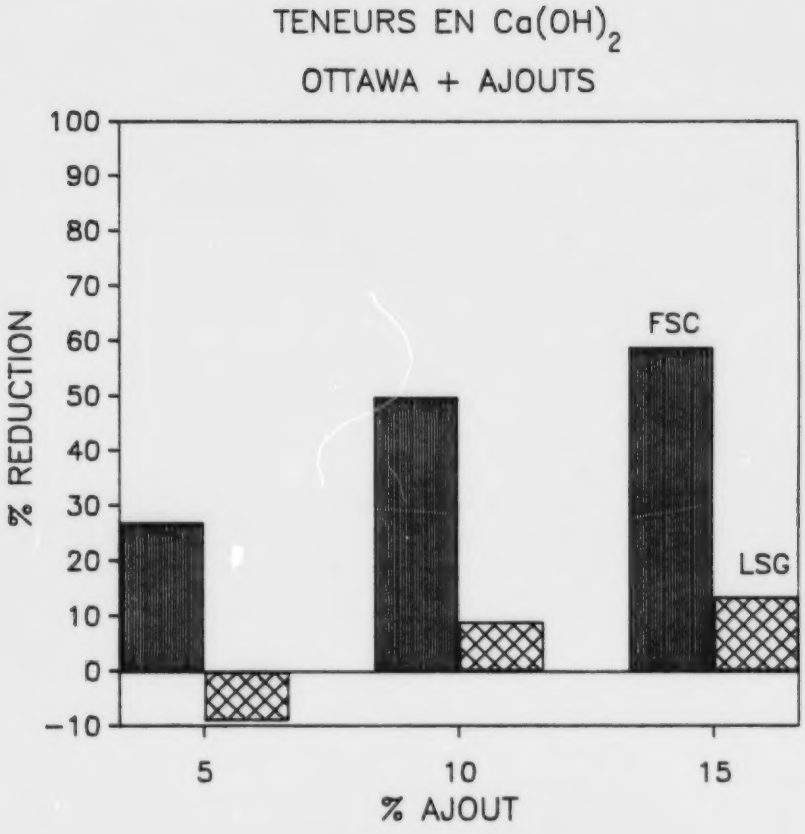


Fig. 63-Histogramme de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Bétons fabriqués avec le granulats d'Ottawa et avec ajouts, à 6 mois)

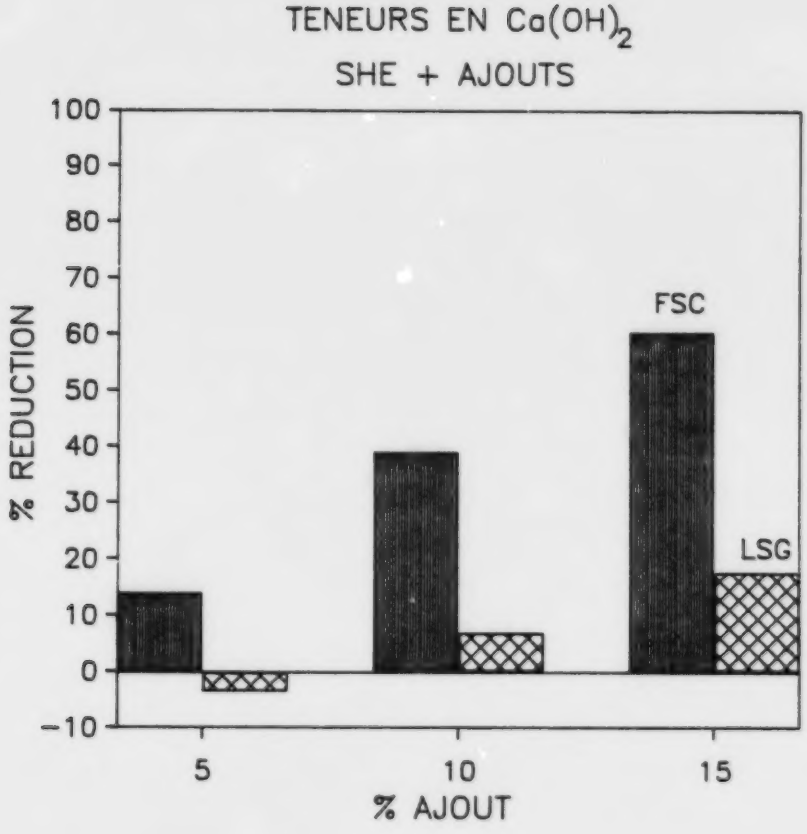


Fig. 64-Histogramme de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ obtenues par analyse thermogravimétrique. (Bétons fabriqués avec le granulats de Sherbrooke et avec ajouts, à 6 mois)

CHAPITRE IX

RESULTATS DES ANALYSES PAR DIFFRACTIONS DES RAYONS X

Nous avons effectué des diffractions des rayons X sur les mêmes échantillons qui ont servi aux analyses thermogravimétriques (voir les figures 65 à 73). Il s'agit donc d'échantillons de pâte et de béton âgés de 6 mois. Les détails concernant ces essais sont donnés à l'annexe E.

En ce qui concerne les teneurs en $Ca(OH)_2$, dans l'ensemble, les résultats obtenus à partir des diffractions des rayons X corroborent très bien les résultats obtenus par analyses thermogravimétriques. Pour les bétons avec des teneurs élevés en FSC, seules les analyses thermogravimétriques ont permis de déceler avec certitude la présence de $Ca(OH)_2$, si faible soit-elle.

L'analyse des patrons de diffraction-X des échantillons de pâte permet de visualiser la diminution progressive du pourcentage de $Ca(OH)_2$ en fonction du pourcentage de FSC. Ceci se traduit par une diminution de la hauteur des pics de diffraction du $Ca(OH)_2$. Outre ce

changement, il n'y a pas de changement majeur parmi les autres phases cristallines présentes au point de vue de la hauteur des pics et/ou de leur position. Nous n'avons détecté aucune nouvelle phase cristalline.

L'analyse des patrons de diffraction-X des échantillons de béton ne permet pas de déceler de nouvelles phases cristallines qui seraient produites par la réaction alcalis-granulats à l'intérieur des échantillons. Nous savons qu'initialement, les produits de réaction entre les alcalis et les granulats sont des gels amorphes calco-silico-alcalins (Durand et Bérard, 1986), mais nous savons également que ce gel peut cristalliser à certains endroits dans le béton. Il semble que la faible quantité de ce gel cristallisé, si toutefois il est présent, ne soit pas détectable à partir des échantillons utilisés ici.

L'analyse des patrons de diffraction-X des échantillons de béton permet de visualiser, quoique de manière moins évidente que pour les échantillons de pâte, la diminution progressive de la teneur en $Ca(OH)_2$ des échantillons avec FSC. A 15% de remplacement, l'identification certaine des pics majeurs du $Ca(OH)_2$ devient pratiquement impossible.

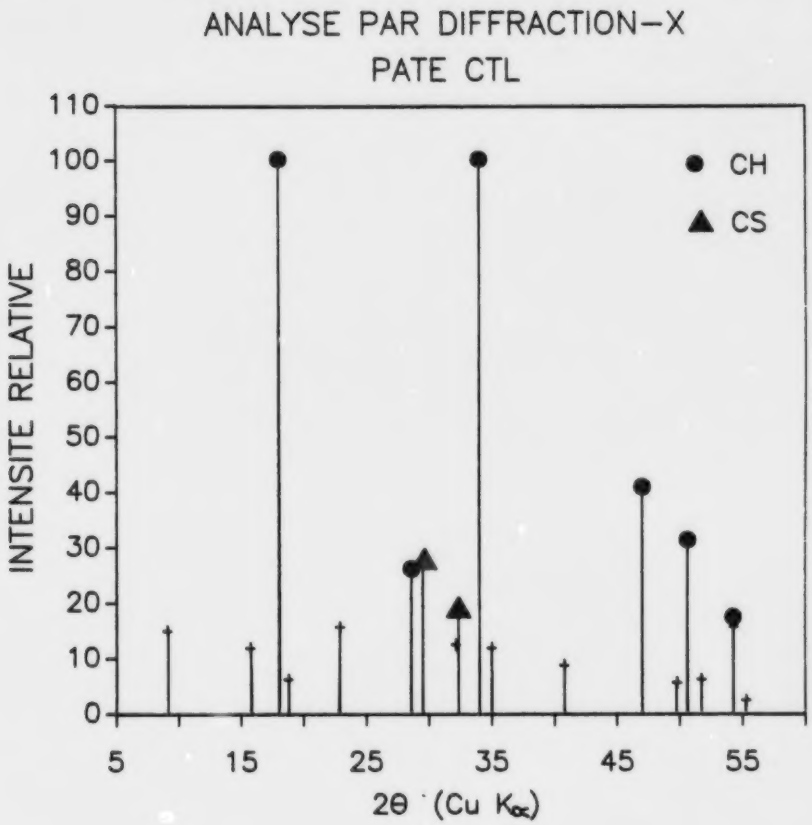


Fig. 65-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte pure, à 6 mois. La position et la hauteur des lignes correspondent à la position et la hauteurs centrales des pics observés sur le diffractogramme. (CH = $Ca(OH)_2$ et CS = Silicates de calcium non-hydratés)

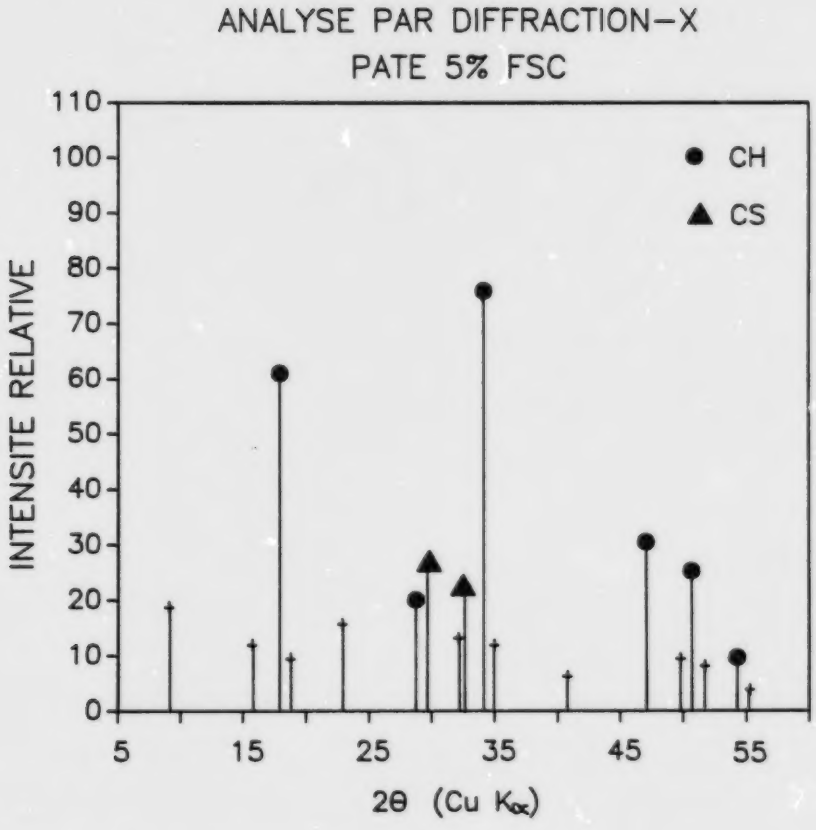


Fig. 66-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 5% de FSC, à 6 mois.

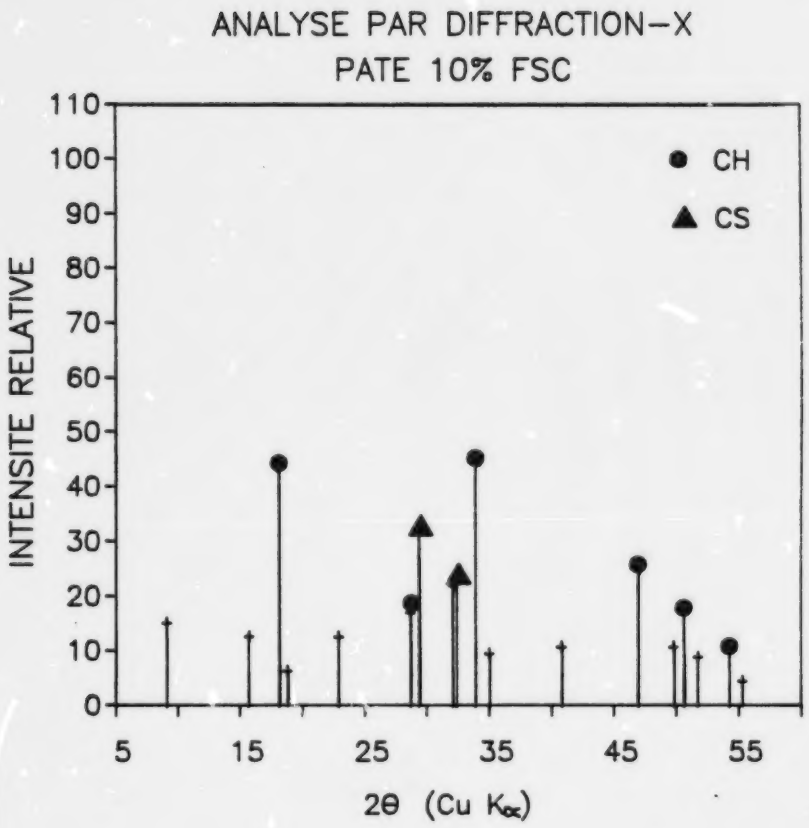


Fig. 67-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 10% de FSC, à 6 mois.

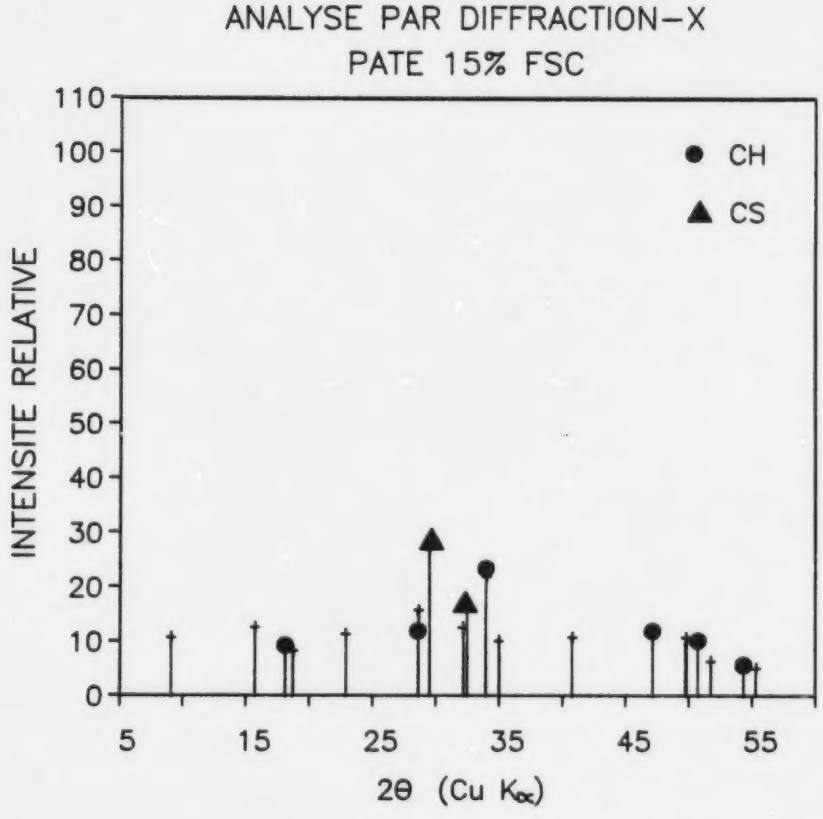


Fig. 68-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 15% de FSC, à 6 mois.

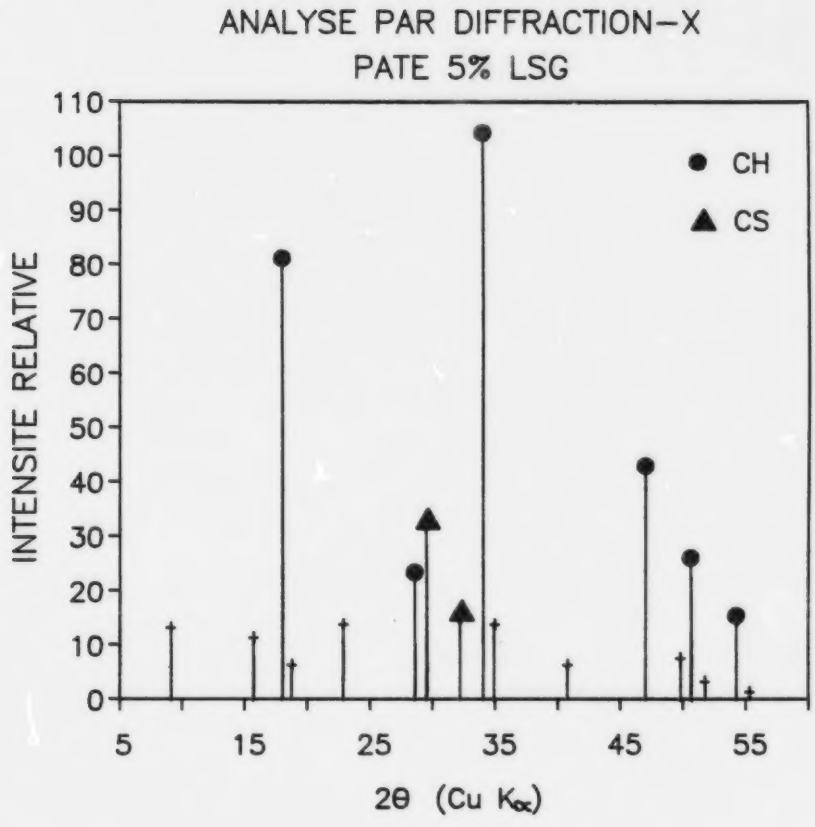


Fig. 69-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 5% de LSG, à 6 mois.

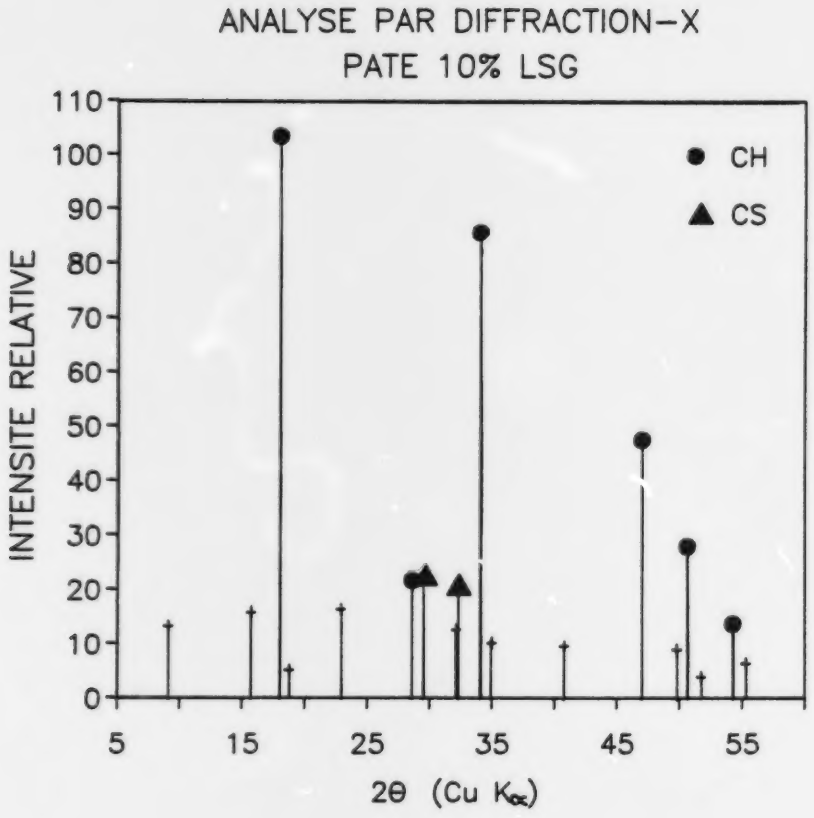


Fig. 70-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 10% de LSG, à 6 mois.

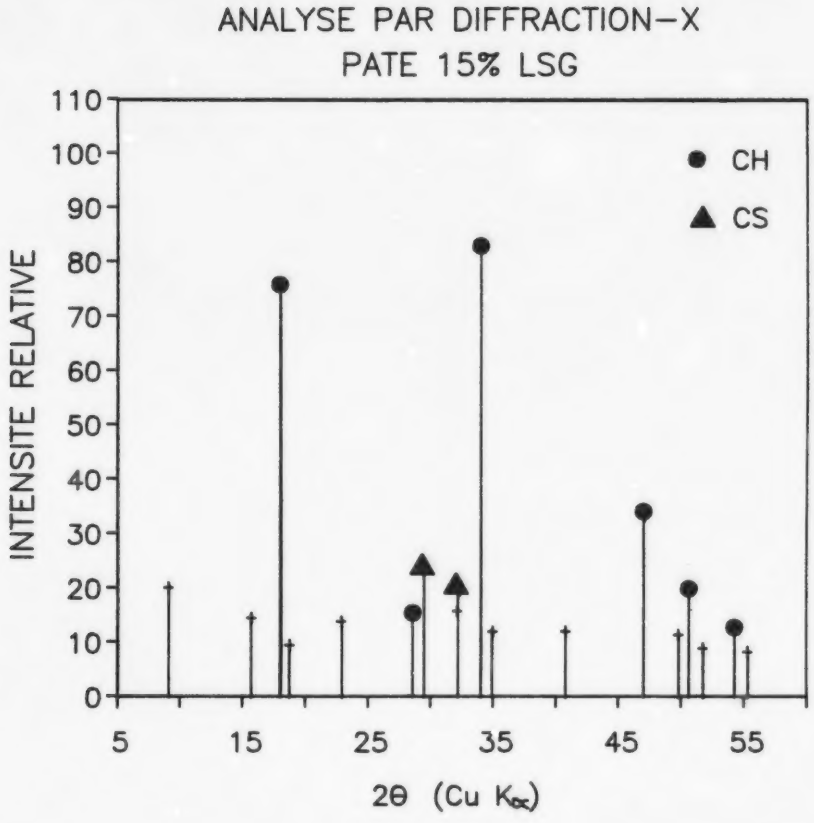


Fig. 71-Intensité relative des pics de diffraction des rayons X pour la pâte avec 15% de LSG, à 6 mois.

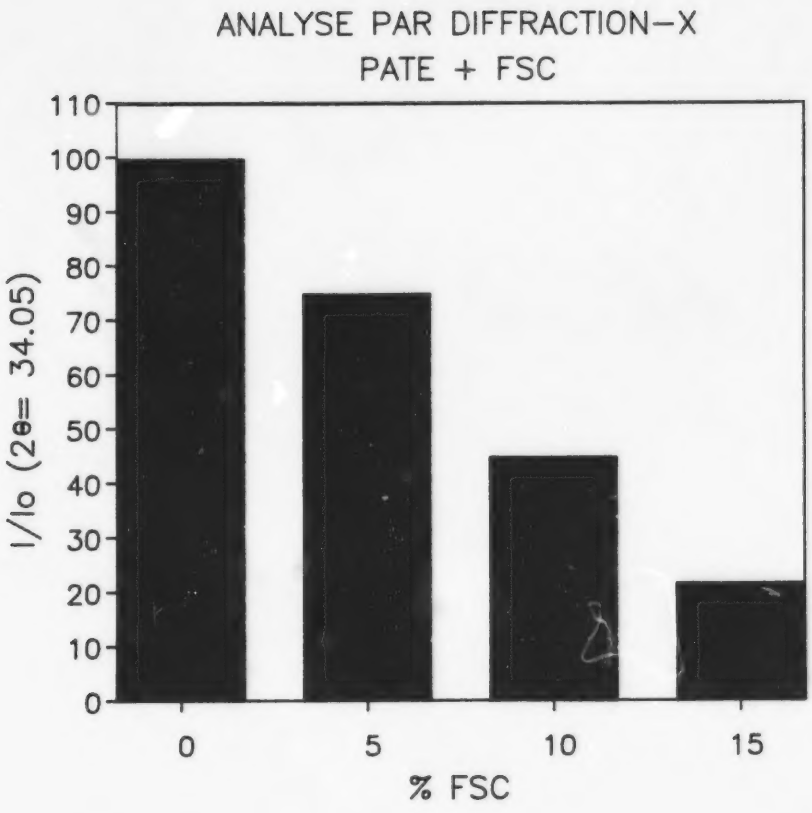


Fig. 72-Comparaison de l'intensité du pic principal du $Ca(OH)_2$ pour la pâte pure et les pâtes avec 5%, 10% et 15% de FSC. (A 6 mois)

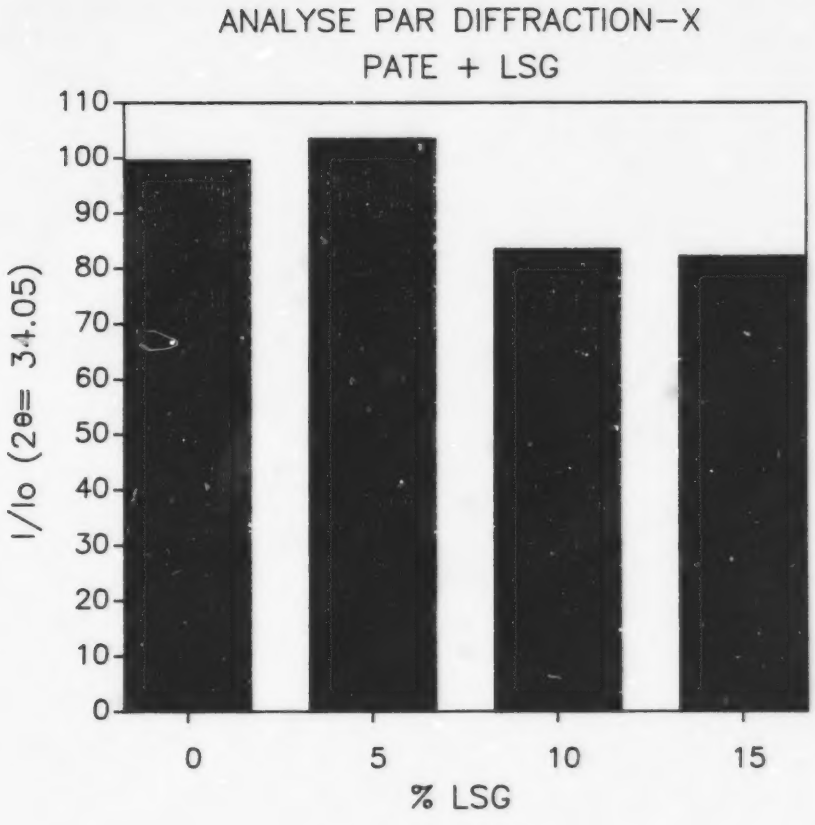


Fig. 73-Comparaison de l'intensité du pic principal du $Ca(OH)_2$ pour la pâte pure et les pâtes avec 5%, 10% et 15% de LSG. (A 6 mois)

CHAPITRE X

RESULTATS DES OBSERVATIONS EFFECTUEES AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

Nous avons effectué des observations et des analyses des produits de réaction à partir d'échantillons de béton âgés de 6 mois à l'aide d'un microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre à dispersion d'énergie. Les détails concernant ces essais sont donnés à l'annexe F, page 277. Les figures 74 à 93 présentent quelques résultats obtenus à partir des observations effectuées au microscope électronique à balayage.

Les observations effectuées confirment le développement dans nos échantillons de laboratoire des mêmes types de produits de réaction qu'on retrouve habituellement dans des bétons dits in situ. La différence principale se situe au niveau du temps avec lequel les produits de réaction se sont développés à l'intérieur de nos échantillons, soit environ 6 mois ou moins, tandis que pour les bétons "in situ" fabriqués avec le même type de granulats, il faut plusieurs années, généralement plus de 5 années, avant que la même quantité de produit de réaction soit produite. Quant au reste, la localisation et la morphologie des produits de réaction demeurent les

mêmes pour nos bétons que pour les bétons "in situ". Il s'agit de gels calco-silico-alcalins se situant dans les granulats calcaires sous forme de fines veinules (moins de 0.1 mm) ou en périphérie dans le cas du granulat de Sherbrooke, de dépôts amorphes et cristallisés dans les pores de la pâte de ciment et à la surface des échantillons. Comme pour le cas des bétons "naturels", nous avons remarqué de l'ettringite en quelques endroits dans les pores des échantillons. L'ettringite se présente sous forme de cristaux en aiguille formant parfois des amas arborescents.

Les échantillons contenant de la FSC présentent les mêmes produits de réaction que les échantillons de contrôle sauf qu'ils sont généralement moins abondants ou à peu près absents, comme pour le cas des échantillons avec 10% ou plus de FSC. La même remarque s'applique aux échantillons contenant du LSG, mais les quantités de produits de réaction sont plus grandes que pour ceux contenant de la FSC, voire même aussi abondantes que dans les échantillons de contrôle, notamment à 5% de remplacement.

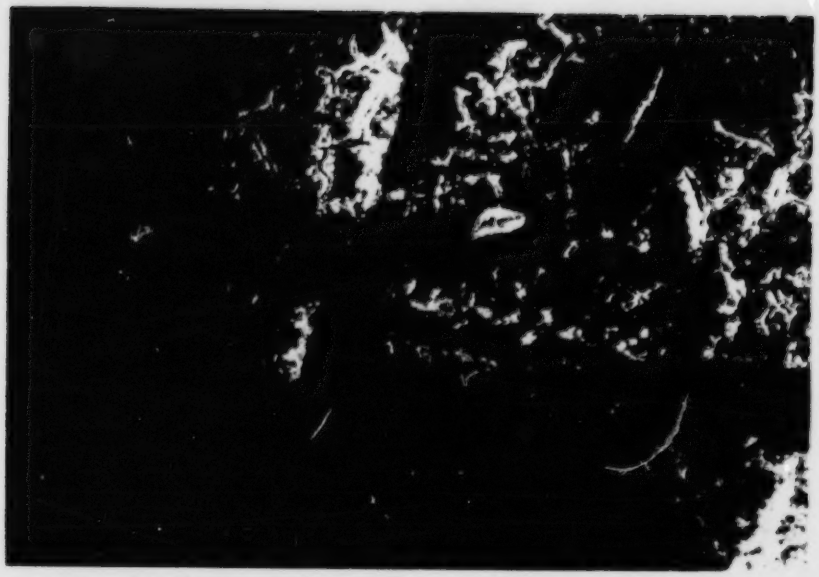


Fig. 74-Photographie prise au MEB montrant du gel calco-silico-alcalin à la surface externe d'un béton fabriqué avec le granulat de Trois-Rivières. (TR-CTL, 1 an) (250 X)

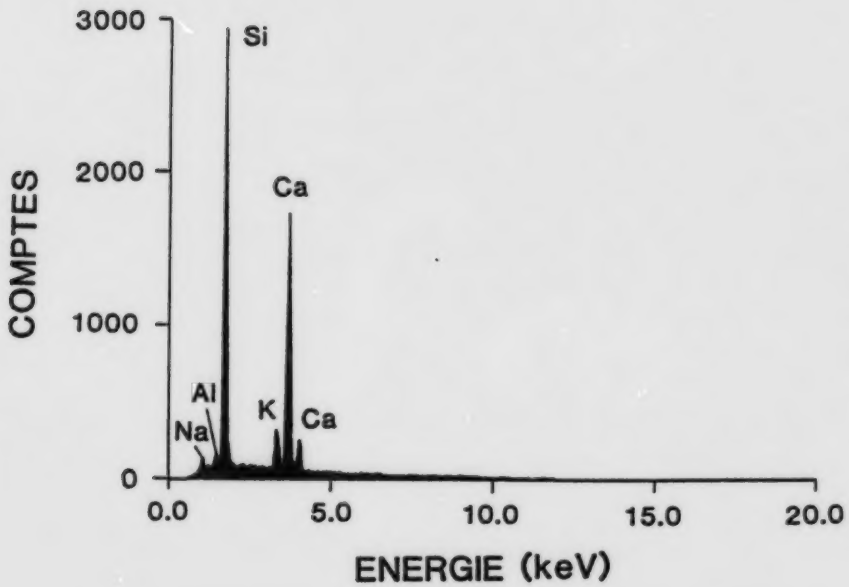


Fig. 75-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 74.

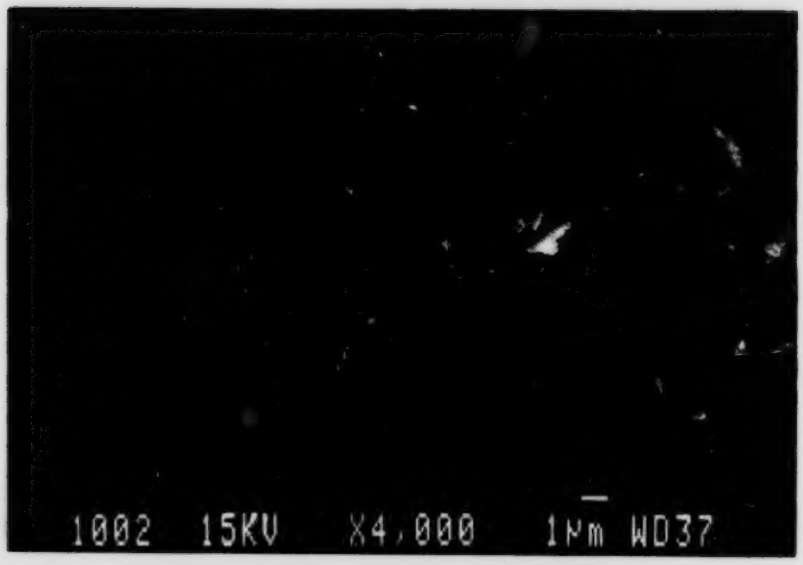


Fig. 76-Photographie prise au MEB montrant de l'ettringite fibreuse au sein d'un pore du même échantillon que la figure précédente. (TR-CTL, 1 an) (4000 X)

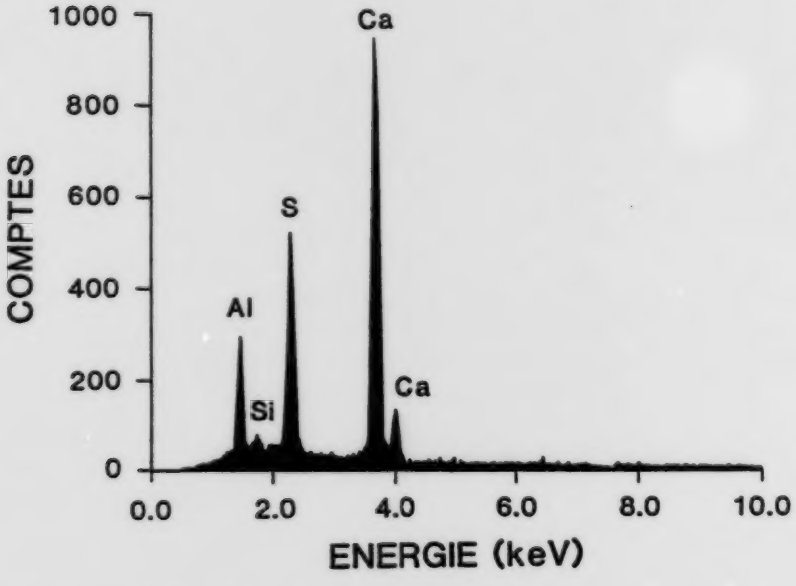


Fig. 77-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de l'ettringite présentée à la figure 78.

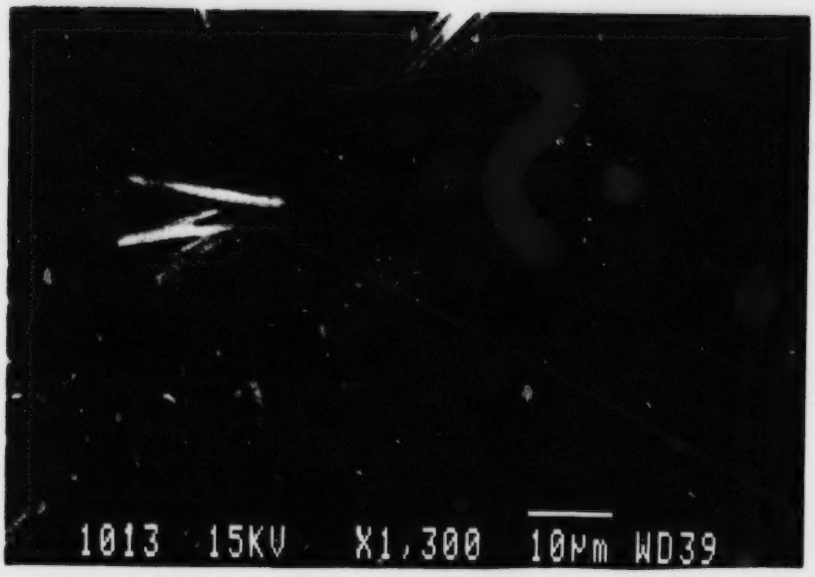


Fig. 78-Photographie prise au MEB montrant de l'ettringite ou ettringo-thaumasite en fines aiguilles au sein d'un pore d'un béton fabriqué avec le granulat de Trois-Rivières combiné avec un ajout de lithium. (TR-0.5% Li_2CO_3, 1 an) (1300 X)

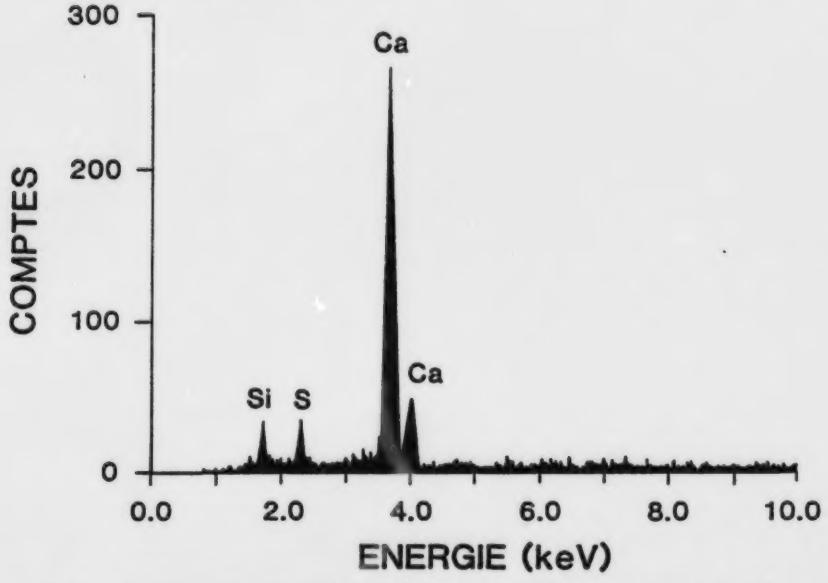


Fig. 79-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de l'ettringite ou ettringo-thaumasite présentée à la figure 78.

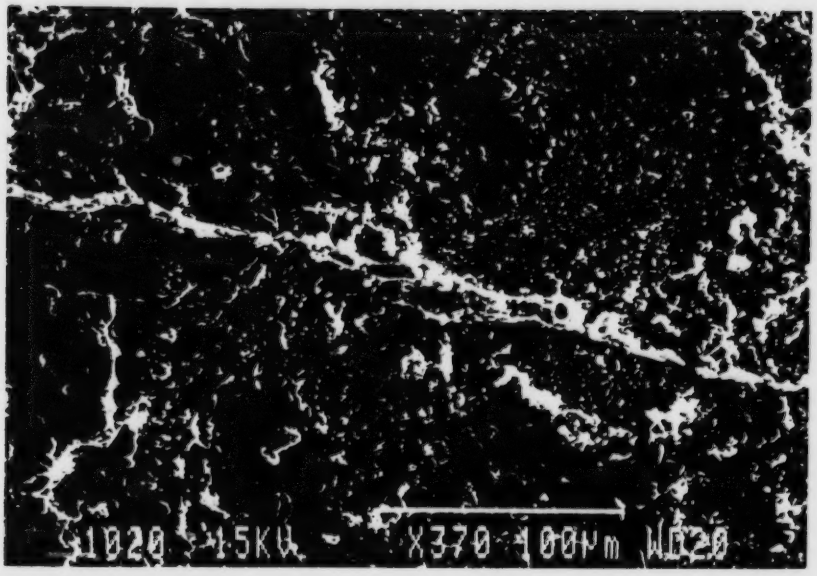


Fig. 80-Photographie prise au MEB montrant une veinule de gel calco-silico-alcalin au sein du granulat de Trois-Rivières. (TR-10%-PQ, 1 an) (370 X)

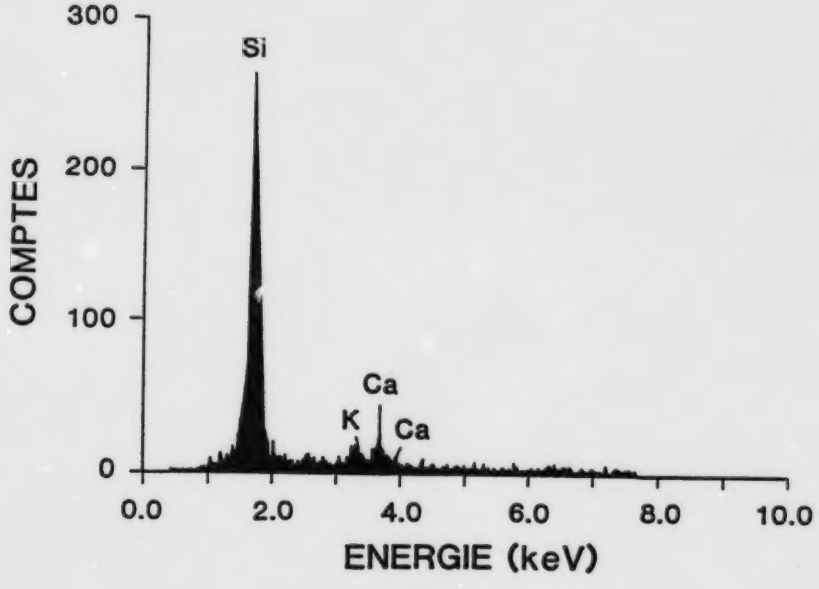


Fig. 81-Spectre de l'analyse par fluorescence-X de la veinule de gel présentée à la figure 80.

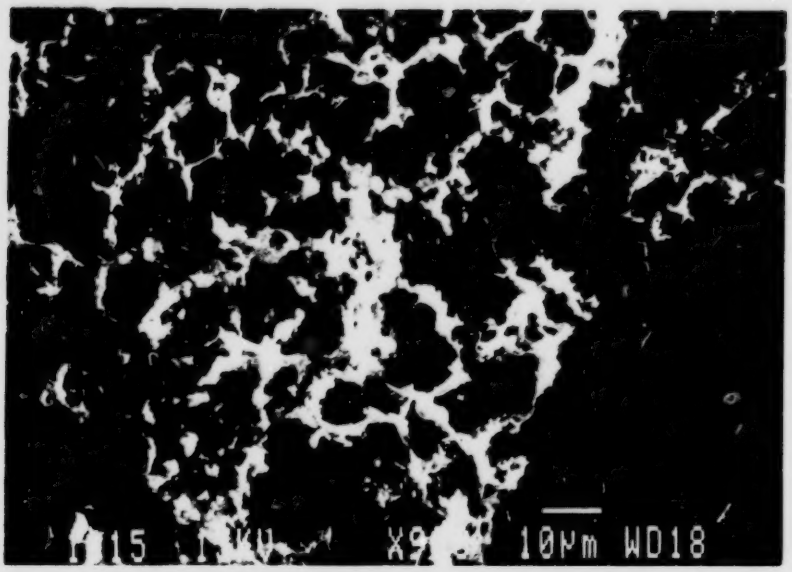


Fig. 82-Photographie prise au MEB montrant le résidu insoluble du granulat de Trois-Rivières. (Surface sciée puis attaquée à l'HCl 10%). Il s'agit d'un réseau de silice secondaire et d'argile enveloppant les grains de carbonates. (Calcite et aussi dolomite) (900 X)

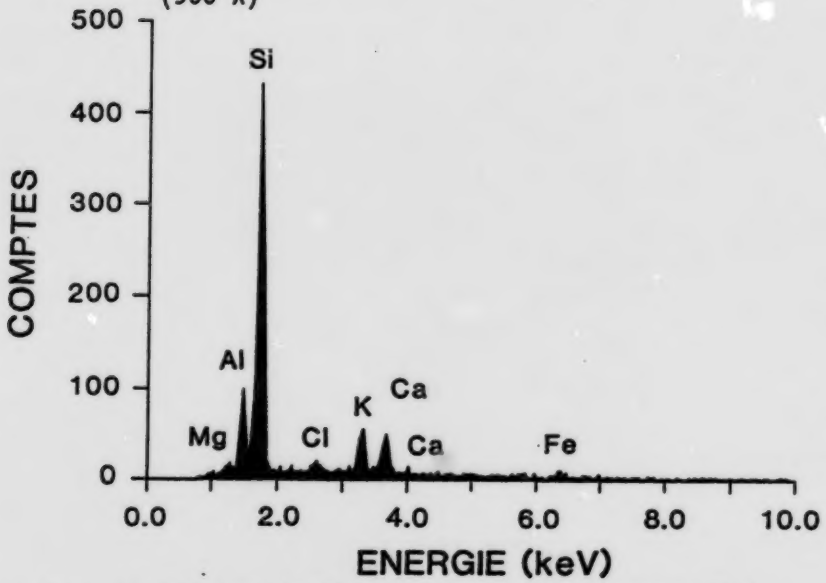


Fig. 83-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du résidu insoluble présenté à la figure 82.

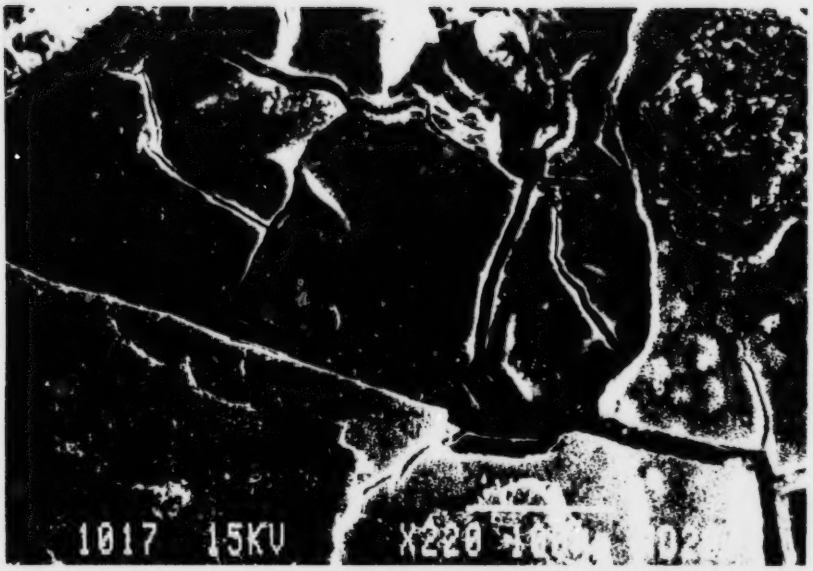


Fig. 84 A-(220 X)

Fig. 84-A,B,C-Photographies prises au MEB montrant l'aspect morphologique d'un gel calco-silico-alcalin à la surface externe d'un béton fabriqué avec le granulat de Trois-Rivières combiné avec un ajout de poussière de quartz. (TR-10%-PQ, 1 an)

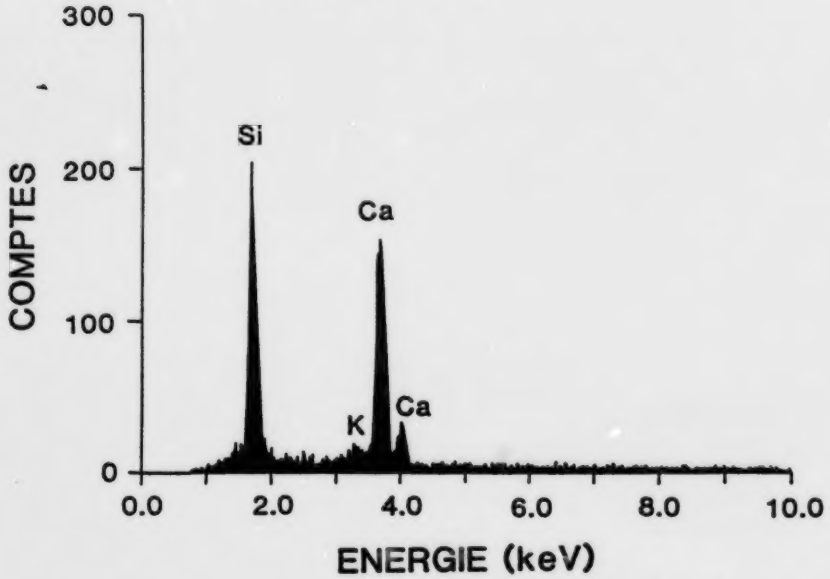


Fig. 85-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté aux figures 84 A, B et C. (SDE)

Fig. 84 B-(800 X)

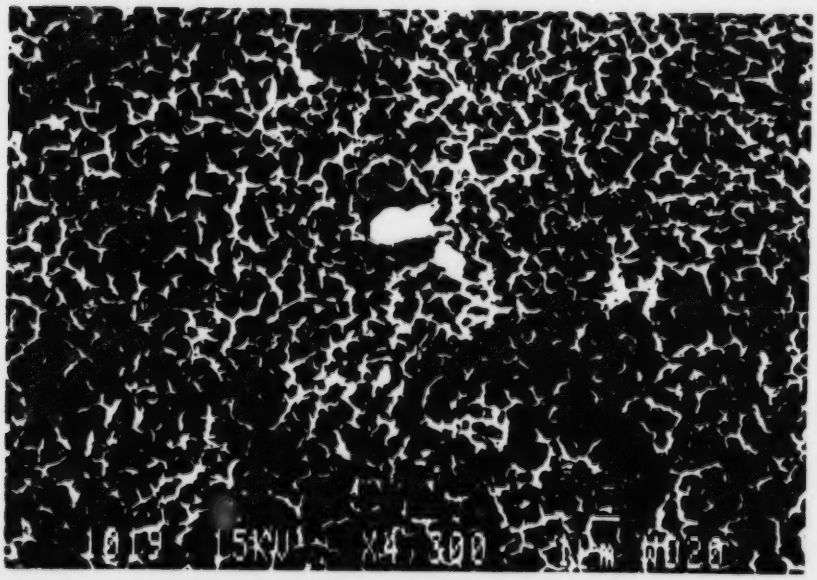


Fig. 84 C-(4300 X)

Fig. 86-Photographie prise au MEB montrant du gel calco-silico-alcalin au sein d'un pore d'un béton fabriqué avec le granulat de Sherbrooke combiné avec un ajout de laitier silicaté granulé. (SHE-10%-LSG, 6 mois) (330 X)

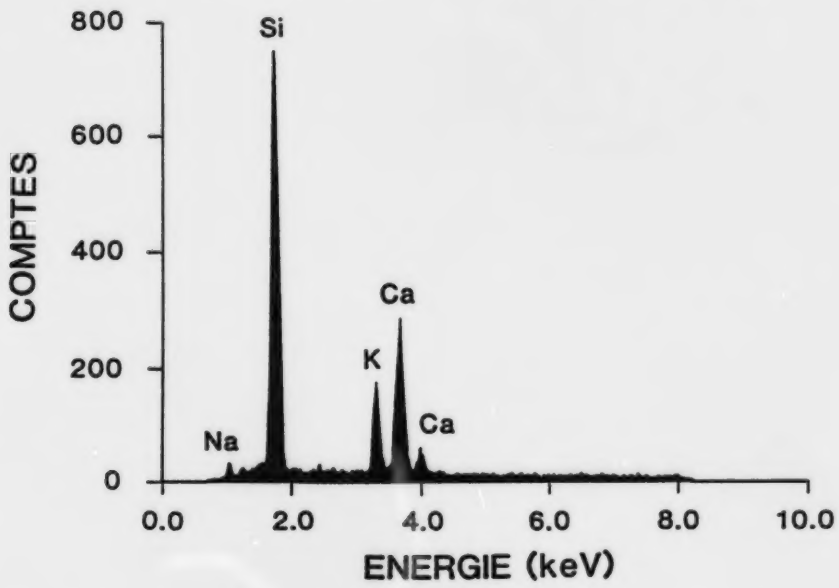


Fig. 87-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 86.

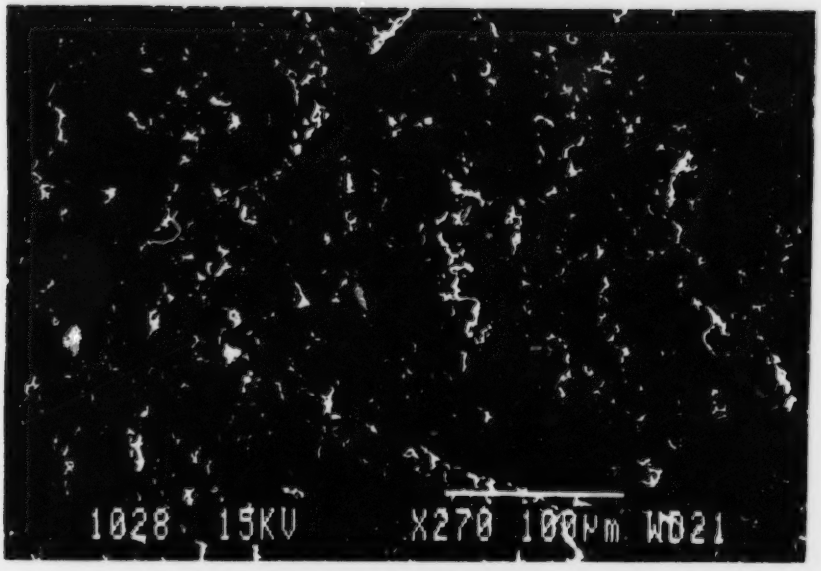


Fig. 88-Photographie prise au MEB montrant le résidu insoluble du granulat d'Ottawa. (Surface sciée puis attaquée à l'HCl 10%). Il s'agit d'un réseau de silice secondaire et d'argile enveloppant les grains de carbonates. (Calcite et aussi dolomite) (270 X)

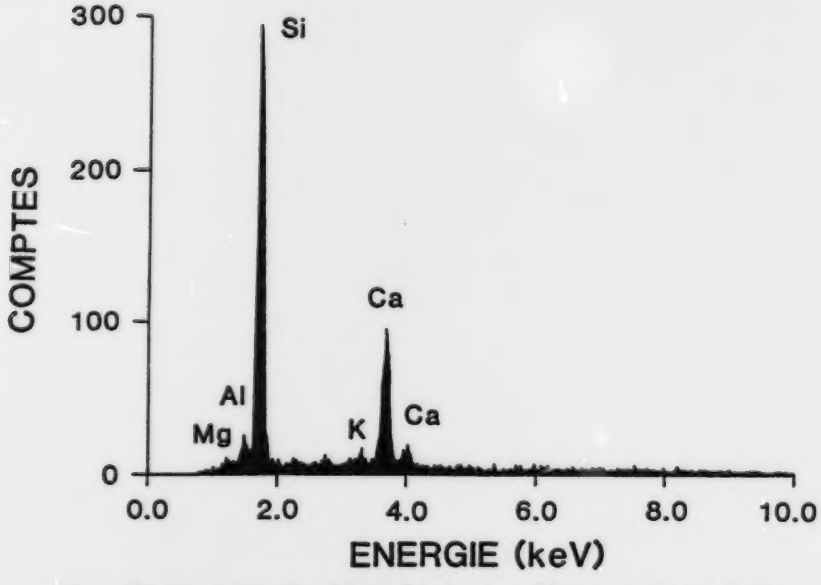


Fig. 89-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du résidu insoluble présenté à la figure 88.

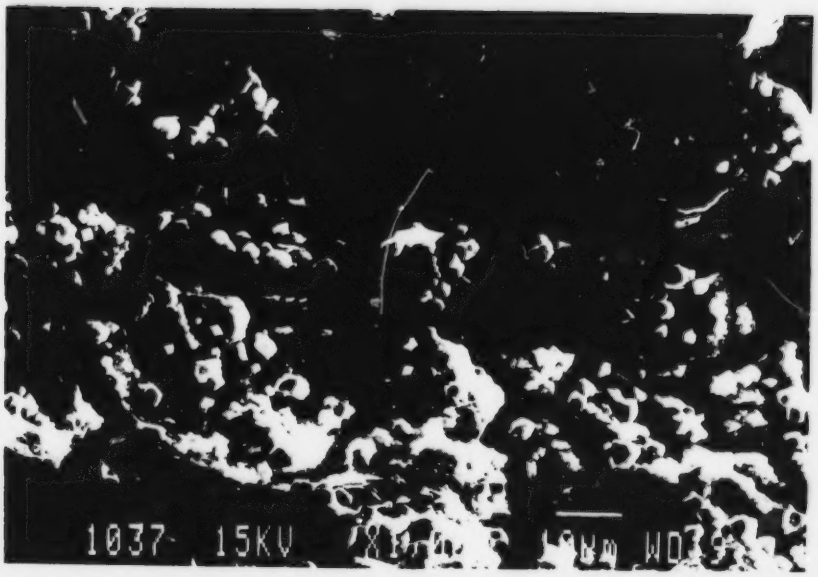


Fig. 90-Photographie prise au MEB montrant du gel calco-silico-alcalin au sein d'un pore d'un béton fabriqué avec le granulat d'Ottawa combiné avec un ajout de laitier silicaté granulé. (OTT-5%-LSG, 6 mois). Notez la présence de petits cristaux rhomboédriques à la surface des écailles de gel. (1000 X)

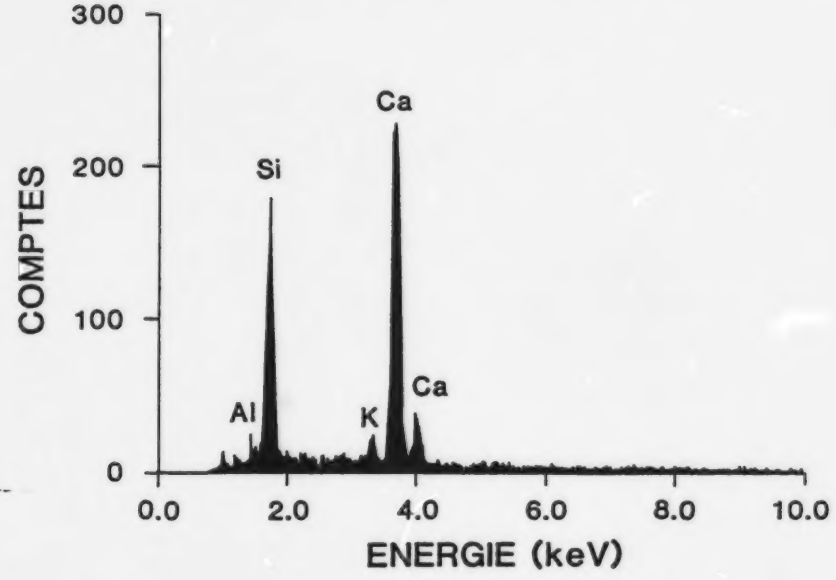


Fig. 91-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du gel présenté à la figure 90

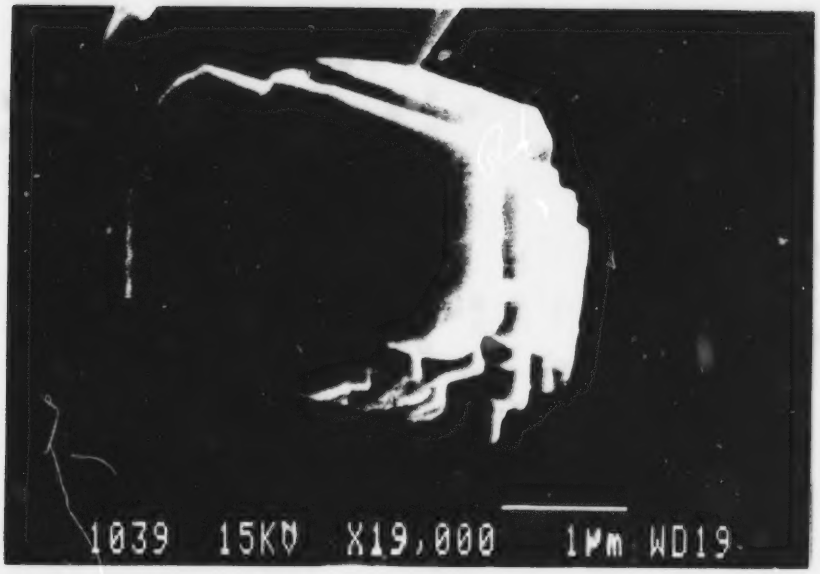


Fig. 92-Photographie prise au MEB montrant à fort grossissement les cristaux cités à la figure 90. (19000 X)

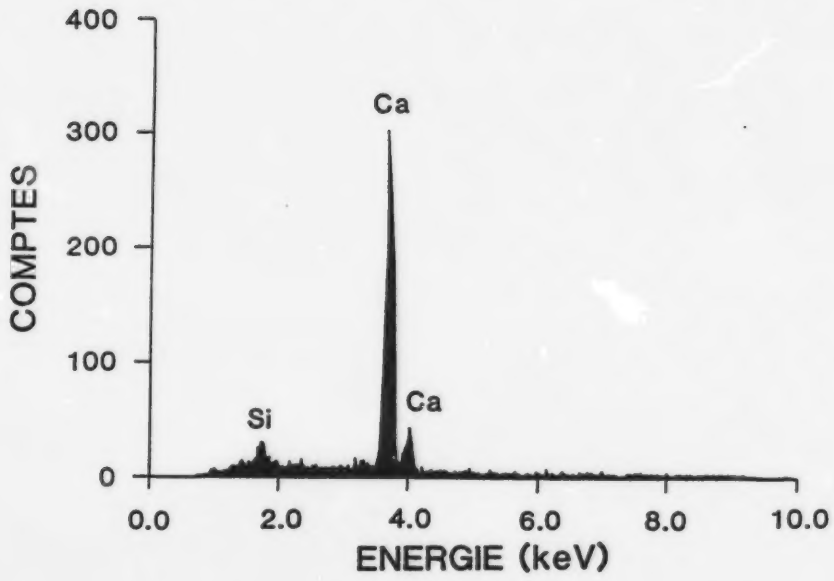


Fig. 93-Spectre de l'analyse par fluorescence-X du cristal présenté à la figure 92.

CHAPITRE XI

RESULTATS DES EXAMENS PETROGRAPHIQUES

Nous avons effectué l'examen pétrographique des échantillons de béton fabriqués à partir des mêmes mélanges qui ont servi à fabriquer les prismes de béton des essais d'expansion (voir le chapitre V). Nous fournissons les détails concernant les examens pétrographiques à l'annexe G.

Notre attention a porté plus particulièrement sur la présence de fissures dans ou au pourtour des granulats, sur la présence de gel dans les granulats, au pourtour de ceux-ci, dans la pâte et les pores de la pâte et à la périphérie des échantillons (il s'agit de tranches de cylindres). Nous avons également noté la présence ou non de fissures à la périphérie des échantillons.

XI.1- LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES

Nous avons effectué l'examen pétrographiques des échantillons de béton fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières après une année de cure à 38 °C dans des contenants dont le double-fond est rempli d'eau (38 °C à une humidité relative supérieure à 95%).

Le tableau 12 présente les résultats des comptages effectués afin de déterminer le pourcentage de microfissures visibles à l'intérieur des granulats à l'aide d'une loupe binoculaire à un grossissement maximum de 40X. Il s'agit probablement de microfissures induites par le dynamitage et le concassage de la pierre (Bérard et Roux, 1986). Par la suite, ces microfissures se développent dû aux effets de la réaction alcalis-granulats.

Un comptage effectué sur un échantillon témoin âgé de 1 mois nous a permis d'estimer à environ 20% le pourcentage de microfissures visibles selon le même procédé de détection. Nous avons considéré ce pourcentage de microfissures comme étant le pourcentage initial de microfissures reliées au dynamitage et au concassage de la pierre.

Pour l'échantillon de contrôle, à 1 an, nous avons noté 86% de microfissures. Les échantillons contenant le LSG, à 1 an, démontrent des pourcentages de microfissures dans le granulat grossier supérieur à 90%. A 5% et 10% de remplacement, les échantillons avec FSC démontrent, à 1 an, respectivement 81% et 17% de granulats microfissurés. La présence de microfissures n'implique pas nécessairement qu'elles soient remplies de gel calco-silico-alcalin. Par exemple, à 10% de FSC, nous notons 17% de microfissures dans le granulat grossier mais nous ne notons aucun gel remplissant ces microfissures. Ceci est également valable en cassure fraîche où il est plus facile de percevoir la présence de gel sur les surfaces des

microfissures plus qu'en section.

Cependant, dans certains échantillons, nous avons détecté la présence de gel calco-silico-alcalin dans les microfissures. Ceci est le cas de l'échantillon de contrôle où le gel forme de fines veinules nettement visibles au binoculaire. Outre l'échantillon de contrôle, la présence de gel dans les microfissures est difficile à déceler en section et c'est en cassure fraîche, au niveau des surfaces des microfissures dans les granulats, que la présence de gel est noté avec le plus de certitude. En effet, nous observons une fine pellicule de gel transparent à l'aspect humide, ce qui signifie que ce gel est assez frais ou récent.

Tous les échantillons, sauf l'échantillon avec 10% de FSC, présentent du gel calco-silico-alcalin au niveau des pores de la pâte ou à la surface externe des échantillons. Plusieurs pores de l'échantillon de contrôle sont complètement remplis d'un gel blanc et crayeux. D'autres échantillons, comme l'échantillon avec 0.5% et 1.0% de Li_2CO_3 présentent 2 types de gel au niveau de la pâte, i.e., du gel blanc et crayeux et du gel translucide. Certains pores contiennent une alternance de ces types de gel en couches lamellaires.

La plupart des échantillons présentent des microfissures au niveau de la surface externe des échantillons sauf les échantillons

avec 5% de FSC et 1.0% de Li_2CO_3 qui ne présentent pratiquement pas de ces microfissures et l'échantillon avec 10% de FSC qui n'en présentent pas du tout.

XI.2- LE GRANULAT D'OTTAWA

Nous avons effectué l'examen pétrographiques d'échantillons de béton fabriqués avec le granulat d'Ottawa après 6 mois de cure à 38 °C dans des contenants dont le double-fond est rempli d'eau (38 °C à une humidité relative supérieure à 95%).

Le tableau 13 présente les résultats des comptages effectués afin de déterminer le pourcentage de microfissures visibles à l'intérieur des granulats à l'aide d'une loupe binoculaire à un grossissement maximum de 40X. Un comptage effectué sur un échantillon témoin âgé de 1 mois nous a permis d'estimer à environ 25% le pourcentage de microfissures visibles selon le même procédé de détection. Pour l'échantillon de contrôle, à 6 mois, nous avons noté 92% de microfissures. A 5%, 10% et 15% de remplacement, les échantillons contenant le LSG démontrent un pourcentage respectif de microfissures de 87%, 81% et 67%. A 5%, 10% et 15% de remplacement, les échantillons contenant la FSC démontrent un pourcentage respectif de microfissures de 64%, 35% et 26%.

Dans la majorité des cas, les microfissures ne sont pas remplies, du moins de façon apparente sur les sections, de gel calco-silico-alcalin. Toutefois, en cassure fraîche où l'on peut observer les surfaces de microfissures des granulats, nous avons observé du gel translucide formant une mince pellicule et parfois du gel crayeux blanc et ceci pour la plupart des échantillons, sauf pour l'échantillon avec 15% de FSC.

Au niveau des pores de la pâte et de la surface externe des échantillons, nous avons observé du gel calco-silico-alcalin en abondance pour l'échantillon de contrôle et les échantillons contenant le LSG. Pour les échantillons avec la FSC, l'abondance de ce gel au niveau des pores de la pâte et de la surface externe de échantillons est beaucoup moins importante. Au niveau des pores des échantillons avec 5% et 10% de LSG, nous avons observé 2 types de gel, i.e., un d'aspect crayeux et de couleur blanche et un d'aspect lisse et translucide.

X1.3- LE GRANULAT DE SHERBROOKE

Nous avons effectué l'examen pétrographiques d'échantillons de béton fabriqués avec le granulat de Sherbrooke après 6 mois de cure à 38 °C dans des contenants dont le double-fond est rempli d'eau (38 °C à une humidité relative supérieure à 95%).

Contrairement aux granulats de Trois-Rivières et d'Ottawa, les évidences de réaction alcalis-granulats sont beaucoup moins nombreuses dans ce cas-ci. Le tableau 14 présente les résultats des comptages effectués afin de déterminer le pourcentage de microfissures visibles à l'intérieur des granulats à l'aide d'une loupe binoculaire à un grossissement maximal de 40X. Un comptage effectué sur un échantillon témoin âgé d'un mois nous a permis d'estimer à environ 35% le pourcentage de microfissures visibles selon le même procédé de détection. Pour l'échantillon de contrôle, à 6 mois, nous avons noté 40% de microfissures. A 5%, 10% et 15% de remplacement, les échantillons contenant le LSG démontrent un pourcentage respectif de microfissures de 39%, 44% et 46%. A 5%, 10% et 15% de remplacement, les échantillons contenant la FSC démontrent un pourcentage respectif de microfissures de 40%, 38% et 35%.

Dans tous les cas, les microfissures ne sont pas remplies de gel calco-silico-alcalin, du moins de façon apparente sur les sections. En cassure fraîche, nous avons observé en un seul endroit une mince pellicule de gel dans une microfissure de granulat.

Nos observations ont également porté sur la présence ou non de gel calco-silico-alcalin au niveau des pores de la pâte et au niveau de la surface externe des échantillons. Nous avons noté la présence de gel d'aspect crayeux dans quelques pores de l'échantillon de contrôle, des échantillons contenant le LSG et de l'échantillon avec

5% de FSC. Pour les échantillons avec 10% et 15% de FSC, les évidences de réaction sont à peu près nulles si ce n'est de la présence d'un mince dépôt transparent d'aspect humide au fond de certains pores.

Au niveau de la surface externe des échantillons, seul l'échantillon de contrôle et les échantillons contenant le LSG, à 5% et 10% de remplacement, présentent quelques fines microfissures.

XI.4- DISCUSSION

Les examens pétrographiques confirment le développement à l'intérieur de nos bétons de laboratoire d'une réaction alcalis-granulats. A partir des différents points relevés, nous constatons que le développement de gel à l'intérieur des granulats calcaires (granulat de Trois-Rivières et d'Ottawa) est peu important, du moins de ce qui peut être perçu à la loupe binoculaire (40X) et ce malgré l'ampleur de l'expansion.

Nous voulons faire ici un parallèle entre nos bétons expérimentaux et les bétons de structures existantes où la réaction alcalis-granulat a été identifiée. Dans ce dernier cas, les veinules sont habituellement visibles à l'oeil nu et atteignent souvent une épaisseur supérieure à 0.2 mm (Bérard, 1985, Durand, 1985, Fournier

et Bérubé, 1985, Houde, 1986 et Durand et Bérard, 1987).

Il s'agirait donc de bétons où la réaction alcalis-granulats est déjà très avancée. Reste à savoir si nous pouvons établir une relation entre l'épaisseur de ces veinules et le degré d'avancement de l'expansion et de la fissuration des bétons affectés.

Dans le même ordre d'idées, les échantillons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke présente en périphérie peu ou pas de gel visible à la loupe binoculaire (40X) après 6 mois de cure malgré qu'une certaine expansion se soit déjà produite.

En général, d'après les observations que nous avons effectuées, il semble que l'absence ou la quasi-absence de gel au niveau des pores de la pâte soit un bon indice que peu de réaction alcalis-granulats s'est produite et que par conséquent les expansions associées seront peu importantes. Ceci est le cas des échantillons fabriqués avec le granulat de Sherbrooke en combinaison avec la FSC à 10% et 15% de remplacement, les échantillons fabriqués avec le granulat d'Ottawa en combinaison avec la FSC à 10% et 15 % de remplacement ainsi que les échantillons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières en combinaison avec la FSC à 10% de remplacement.

Spécifiquement en ce qui a trait au pourcentage de microfissuration au niveau des granulats de Trois-Rivières, d'Ottawa

et de Sherbrooke, nos observations démontrent qu'il y a initialement dans ces granulats, des microfissures qui existaient avant même que ceux-ci ne soient utilisés pour fabriquer le béton (Bérard et Roux, 1986). Nous avons estimé à 20%, 25% et 35% les pourcentages respectifs de granulats microfissurés pour les granulats de Trois-Rivières, d'Ottawa et de Sherbrooke. En fait, il est possible que tous les granulats soient microfissurés initialement soit à cause du dynamitage, soit à cause du concassage ou les deux à la fois (Bérard et Roux, 1986), mais notre méthode d'inventaire ne nous a pas permis d'en déceler qu'une certaine partie seulement. L'important est d'avoir utiliser la même méthode d'inventaire pour les échantillons où la réaction alcalis-granulats est déjà avancée.

D'après nos résultats, les échantillons présentant peu ou pas de réaction démontrent un pourcentage de microfissures visibles comparables à celui mesuré sur les échantillons témoins. Pour les cas où la réaction s'est d'avantage manifestée, le pourcentage de microfissures tend vers des valeurs légèrement inférieures, égales ou supérieures à celui des échantillons de contrôle.

Quoiqu'il en soit, malgré sont caractère empirique, le comptage des microfissures a permis de mettre en évidence le mécanisme par lequel la réaction alcalis-granulat se manifeste dans les bétons contenant le type de granulats considéré, i.e. que parallèlement à la production de gel, si minime soit-elle, au niveau des microfissures

préexistantes, une expansion se produit.

Nous avons effectué une expérience afin de démontrer que du gel se forme spontanément à l'intérieur des granulats calcaires réactifs microfissurés lorsque ceux-ci sont placés dans une solution alcaline. Un empilement de plaquettes de calcaire, en solution alcaline, a rapidement gonflé suite à la formation de gel entre les plaquettes. Ceci a permis d'établir que du gel se forme dans les zones d'interfaces des granulats. Les détails concernant cette expérience sont donnés à l'annexe H. Cette expérience résout donc au moins une partie de l'énigme concernant les mécanismes d'expansion des bétons fabriqués avec ce type de granulat. Reste à savoir si le développement des microfissures préexistantes dans les vrais granulats s'amorce à cause de la formation de gel dans ces fissures ou si il s'amorce avant le début de la formation de gel dans celles-ci, par gonflement des granulats eux-mêmes ou par action de contraintes développées ailleurs qu'au coeur des granulats. Par exemple, il pourrait s'agir de contraintes développées au niveau du contact pâte-granulat ou dans la pâte elle-même par formation de gel.

Dans le cas du granulat de Sherbrooke, nous constatons qu'il y a peu ou pas d'évolution ou de différence dans le nombre de microfissures visibles pour les échantillons contenant les différents ajouts et examinés à deux âges différents (1 mois et 6 mois). Ceci tend à confirmer l'hypothèse d'une réaction alcalis-granulat

principalement périphérique (Bérard et Roux, 1986) contrairement au cas des granulats calcaires où la réaction serait interne, du moins en partie.

TABLEAU 12: RESULTATS DES EXAMENS PETROGRAPHIQUES

GRANULAT DE TROIS-RIVIERES

(12 MOIS)

	CTL	FSC		LSG		Li_2CO_3	
		5%	10%	5%	10%	0.5%	1.0%
% GRANULATS FISSURES	(20) 86	81	17	92	94	95	92
VEINULES EN SECTION	V	V	NV	V	V	V	V
GEL EN CASSURE FRAICHE	PA	PA	ABS	PA	PA	PA	PA
GEL DANS LES PORES	TA	MA	ABS	TA	TA	TA	TA
GEL SURFACES EXTERNES	TA	PA	ABS	TA	TA	TA	TA
FISSURES SURFACES EXTERNES	TA	PA	ABS	PA	PA	PA	PA

Légende: (20) = Pourcentage de granulats fissurés dans l'échantillon témoin

V = Visible
NV = Non-visible

TA = Très abondant
MA = Moyennement abondant
PA = Peu abondant

ABS = Absent

TABLEAU 13: RESULTATS DES EXAMENS PETROGRAPHIQUES

GRANULAT D'OTTAWA

(6 MOIS)

	CTL	FSC			LSG		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%
% GRANULATS FISSURES	(25) 92	64	35	26	87	81	67
VEINULES EN SECTION	V	V	NV	NV	V	NV	NV
GEL EN CASSURE FRAICHE	PA	PA	TPA	TPA	PA	PA	PA
GEL DANS LES PORES	TA	PA	PA	PA	TA	TA	TA
GEL SURFACES EXTERNES	TA	PA	ABS	ABS	TA	TA	TA
FISSURES SURFACES EXTERNES	TA	ABS	ABS	ABS	TA	MA	PA

Légende: (25) = Pourcentage de granulats fissurés dans l'échantillon témoin

V = Visible
NV = Non-visible

TA = Très abondant
MA = Moyennement abondant
PA = Peu abondant
TPA = Très peu abondant

ABS = Absent

TABLEAU 14: RESULTATS DES EXAMENS PETROGRAPHIQUES

GRANULAT DE SHERBROOKE

(6 MOIS)

	CTL	FSC			LSG		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%
% GRANULATS FISSURES	(35) 37	40	38	35	39	44	46
VEINULES EN SECTION	NV	NV	NV	NV	NV	NV	NV
GEL DANS LES PORES	PA	PA	ABS	ABS	PA	PA	PA
GEL SURFACES EXTERNES	PA	PA	TPA	TPA	PA	PA	PA
FISSURES SURFACES EXTERNES	PA	ABS	ABS	ABS	PA	PA	ABS

Légende: (35) = Pourcentage de granulats fissurés dans l'échantillon témoin

V = Visible
NV = Non-visible

TA = Très abondant
MA = Moyennement abondant
PA = Peu abondant
TPA = Très peu abondant

ABS = Absent

CHAPITRE XII

DISCUSSION ET CONCLUSIONS GENERALES

Lors de cette étude, nous avions comme objectif principal de déterminer les mécanismes responsables de la réduction des expansions dues à la réaction alcalis-granulats en présence d'ajouts minéraux.

Aux chapitres I à IV, nous avons énuméré l'ensemble des hypothèses qui tentent d'expliquer le rôle des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats ainsi que les diverses techniques expérimentales pouvant servir à vérifier ces hypothèses.

Aux chapitres V à XI, nous avons présenté l'ensemble des résultats des essais que nous avons effectués afin de vérifier ces hypothèses. Nous avons utilisé 2 ajouts minéraux très différents au point de vue physique et chimique afin d'obtenir des résultats variés lors des essais d'expansion. Dans la mesure du possible, nous avons utilisé les mêmes caractéristiques de mélange et le même type de cure pour tous les essais; nous espérions ainsi pouvoir isoler le ou les mécanismes prédominants lorsqu'on observe une réduction d'expansion reliée à la présence d'ajouts minéraux.

Dans les sections qui vont suivre, à partir de l'analyse des

résultats décrits aux chapitres V à XI, nous tentons de vérifier ces diverses hypothèses.

XII.1- SYNTHESE DES RESULTATS

Dans l'ensemble, il semble que l'influence de la fumée de silice condensée (FSC) sur les différents paramètres étudiés augmente en fonction du pourcentage d'ajout. En effet, l'expansion et la teneur en $Ca(OH)_2$ des prismes de béton fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières diminue en fonction du pourcentage de FSC, et, avec 10% de FSC, la teneur en alcalis de la solution interstitielle est inférieure à celle des échantillons qui en contiennent 5%. Toutefois, avec 5% de FSC, nous avons obtenu un coefficient de perméabilité plus faible qu'avec 10%.

Nous avons noté les mêmes tendances en ce qui concerne les granulats d'Ottawa et de Sherbrooke puisque l'expansion des prismes de béton, la teneur en alcalis de la solution interstitielle et la teneur en $Ca(OH)_2$ diminuent en fonction du pourcentage de FSC. De plus, pour le granulat d'Ottawa, nous avons obtenu un coefficient de perméabilité plus faible pour l'échantillon avec 5% de FSC que pour ceux qui en contiennent 10% et 15%. Pour le granulat de Sherbrooke, on observe un coefficient de perméabilité plus faible avec 10% de FSC qu'avec 15%.

A première vue, il semble que si les 2 paramètres principaux à considérer concernant le rôle de la FSC sur la réaction alcalis-granulats sont la teneur en alcalis de la solution interstitielle et la perméabilité, aucun de ces 2 paramètres ne prédomine. Nous constatons tout au plus qu'à 10% et plus de remplacement, les expansions des prismes, les teneurs en alcalis des solutions interstitielles, les teneurs en $Ca(OH)_2$ ainsi que les coefficients de perméabilité sont nettement moindres que pour ceux des échantillons de contrôle. Intuitivement, nous devions nous attendre à de tels résultats puisque la FSC est un ajout à caractère pouzzolanique, i.e., qu'elle possède la capacité d'agir sur l'ensemble des paramètres que nous avons examinés. En effet, puisque la FSC contribue à la formation de C-S-H supplémentaire, celle-ci agit à la fois au niveau de la chimie de la solution interstitielle, de la teneur en $Ca(OH)_2$ de la pâte ainsi qu'au niveau de la perméabilité.

Dans l'ensemble, pour les granulats de Trois-Rivières et d'Ottawa combinés avec le laitier silicaté granulé (LSG), les paramètres que nous avons déterminés sont beaucoup moins affectés, à pourcentage de remplacement équivalent, que dans le cas des échantillons avec FSC. Nous avons tout de même obtenu des réductions d'expansion assez importantes avec le laitier silicaté granulé, mais toutefois moins spectaculaires qu'avec la fumée de silice condensée.

Quant à la combinaison granulat de Sherbrooke-LSG, nos essais d'expansion étant peu avancés, nous ne pouvons affirmer que cet ajout réduit les expansions dues à la réaction alcalis-granulat de façon significative mais tout porte à croire que c'est ce qui se produira.

Finalement, si nous comparons un à un les résultats obtenus pour chacun des paramètres mesurés, nous sommes tentés de conclure que la FSC est plus efficace à réduire les expansions que le LSG parce qu'elle agit d'avantage au niveau du paramètre considéré de façon individuelle (ex.: la FSC réduit d'avantage la perméabilité que le LSG, ce qui a pour effet de réduire d'avantage les expansions). Evidemment, puisqu'il en est ainsi pour chacun des paramètres, il n'est pas possible de définir quel est "le" paramètre déterminant sur les réductions d'expansion observées.

XII.2- CORRELATIONS

Nous présentons aux figures 94 et 95 l'ensemble des résultats que nous avons obtenus sous forme de graphiques où l'on compare les pourcentages de variation obtenus pour les divers paramètres étudiés en fonction des pourcentages de remplacement des ajouts.

L'analyse globale de ces graphiques permet de constater que la meilleure relation entre les réductions des expansions et les

paramètres étudiés est obtenue avec le pourcentage de réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$. En effet, les tendances démontrées par les courbes des réductions des teneurs en $Ca(OH)_2$ sont, dans la majorité des cas, semblables à l'allure des courbes de réduction d'expansion (courbes parallèles). Au deuxième rang, nous retrouvons la concentration en ions Na^+, K^+ et OH^- de la solution interstitielle et au dernier rang, nous retrouvons la perméabilité. Dans ce dernier cas, nous n'observons que très peu de relation entre ce paramètre et les réductions des expansions.

Afin de vérifier les relations observées, nous avons effectué des calculs de régression linéaire. Les figures 96 à 100 présentent les résultats obtenus.

Parmi les 3 paramètres étudiés, le meilleur coefficient de corrélation est obtenu entre les réductions des teneurs en $Ca(OH)_2$ et les réductions d'expansion, soit $R = 0.94$ (voir la figure 96). Les réductions de perméabilité et les réductions des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- (moyenne des trois ions) en fonction des réductions d'expansion donnent respectivement des coefficients de corrélation de 0.51 et 0.41 (voir les figures 97 et 98). D'autres calculs faits à partir des résultats des échantillons avec FSC versus les échantillons avec LSG pour les réductions des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- en fonction des réductions d'expansion donnent respectivement des coefficients de 0.71 et 0.24. (Voir les figures 99 et 100).

Ces résultats s'appliquent strictement aux échantillons de béton. Nous avons également effectué des calculs concernant les réductions d'expansion et les réductions des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- des pâtes avec FSC. Pour les granulats d'Ottawa et de Sherbrooke, nous avons obtenu des coefficients de corrélation de 1.00 et 0.92.

A partir de nos observations, nous sommes tentés de conclure que la teneur en $Ca(OH)_2$ des bétons contenant des granulats réactifs aux alcalis est un facteur déterminant dans l'explication de l'efficacité ou du rôle des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats. Nous sommes également tentés de conclure que la modification de la perméabilité au gaz n'est pas un facteur déterminant dans l'explication de l'efficacité ou du rôle des ajouts minéraux dans les réactions alcalis-granulats. Nous croyons cependant que la prudence est de mise lorsqu'il s'agit d'interpréter, d'une part, des résultats obtenus à partir d'échantillons de béton, qui, comme nous l'avons clairement énoncé au chapitre I, est un matériau composite complexe, et d'autre part, des résultats obtenus à partir d'un nombre restreint d'échantillons. Nous mentionnons ce dernier aspect afin de bien établir que nous sommes conscients que notre étude ne cerne pas l'ensemble des mécanismes responsables de la réduction des expansions dues aux réactions alcalis-granulats. Nous croyons néanmoins que l'approche analytique globale permet d'obtenir une vue d'ensemble des phénomènes physiques et chimiques qui se sont

produits. Enfin, nous croyons que cet aspect est primordial dans l'étude des phénomènes qui concernent le béton mais il implique nécessairement l'investissement de beaucoup d'efforts et de volonté.

XII.3- CONCLUSIONS

L'addition d'ajouts minéraux aux bétons influence chacun des paramètres examinés lors de la présente étude, soit:

1- Les expansions dues aux réactions alcalis-granulats entre les alcalis et les 3 granulats utilisés (calcaires de Trois-Rivières et d'Ottawa et le schiste de Sherbrooke);

2- La teneur en Na^+, K^+ et OH^- de la solution interstitielle;

3- La perméabilité à l'azote et;

4- La teneur en $Ca(OH)_2$

Chacun de ces paramètres a déjà été cité par différents chercheurs (cf. chap. I, II, III et IV) comme étant potentiellement la cause ou le mécanisme responsable de l'efficacité des ajouts minéraux face aux réactions alcalis-granulats. Notre étude démontre que la meilleure corrélation entre la réduction des expansions dues

aux réactions alcalis-granulats et ces différents paramètres provient de la réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ (R = 0.94). Par contre, nous avons obtenu une faible corrélation entre la réduction des expansions dues aux réactions alcalis-granulats et la réduction de la perméabilité à l'azote (R = 0.51).

Le coefficient de corrélation entre les réductions des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- des bétons et les réductions d'expansion des bétons varie de faible à moyen (R_{LSG} = 0.24, R_{FSC} = 0.71). Par contre, la corrélation entre les réductions des teneurs en ions Na^+, K^+ et OH^- des pâtes avec FSC et les réductions d'expansion des bétons est très bonne (R_{moyen} = 0.96).

Les résultats de notre étude démontrent également que la fumée silice condensée possède la capacité de réduire de façon importante les expansions dues aux réactions alcalis-granulats de prismes de béton soumis à une cure de 38 °C et à une humidité relative de 100% et ce pourvu qu'un dosage suffisant soit utilisé. Dans notre cas, il s'agit d'un pourcentage de remplacement du ciment par la fumée de silice condensée d'une valeur de 10% et plus. A aucun des dosages utilisés (5%, 10% et 15%) la fumée de silice condensée n'a augmenté les expansions de nos échantillons. De plus, à 10% et plus de remplacement, la présence de fumée de silice a contribué à diminuer les teneurs en Na^+, K^+ et OH^- de la solution interstitielle, la teneur en $Ca(OH)_2$ ainsi que la perméabilité de nos échantillons.

XII.4- RECOMMANDATIONS

Le faible degré de corrélation obtenu entre les réductions de perméabilité au gaz et les réductions d'expansion nous amène à proposer les hypothèses suivantes:

1-Ce résultat est dû au fait que les mesures effectuées sont incorrectes parce que la méthode utilisée est défaillante.

2-Le nombre de mesures effectuées a été insuffisant car la variance des résultats de cet essai est très grande.

3-Les mesures auraient dues être effectuées à un mois, avant que la réaction alcalis-granulat ne se manifeste.

4-La perméabilité au gaz des bétons ne peut être reliée aux expansions dues aux réactions alcalis-granulats.

Nous croyons que l'hypothèse (1) est à rejeter car la méthode utilisée est simple et les résultats obtenus sont répétitifs. Les hypothèses (2) et (3) sont pertinentes et nous croyons qu'elles devraient être vérifiées lors de travaux ultérieurs. En effet, en ce qui concerne l'hypothèse (3), il nous apparait comme étant logique, dans le contexte du phénomène d'expansions dues aux réactions

alcalis-granulat, d'étudier la relation perméabilité-expansion avant que l'expansion et la fissuration ne se manifeste car celles-ci interfèrent avec les perméabilités mesurées.

Si la vérification de ces trois hypothèses confirment les résultats obtenus lors de cette étude, l'hypothèse (4) devra être envisagée. Il est possible que la perméabilité mesurée ne soit reliée que très indirectement à la mobilité des ions en rapport aux réactions alcalis-granulats.

Les différentes lectures et recherches effectuées lors de cette étude nous ont fait réaliser qu'il existe un autre aspect important à considérer en ce qui concerne le rôle de ajouts minéraux sur les réactions alcalis-granulats: il s'agit de la zone de transition pâte-granulat. Plusieurs chercheurs ont démontré qu'il existe, au niveau du contact pâte-granulat, une zone dite "de transition" possédant des caractéristiques différentes de celles de la pâte de ciment hydraté normale (Maso, 1980, Metha, 1986 et Detwiler et al., 1987), notamment au niveau de la porosité-perméabilité. Il est possible que l'hypothèse de la réduction de la mobilité des ions de la solution interstitielle trouve toute son importance au niveau de la perméabilité de la zone de transition pâte-granulat et non pas au niveau de la perméabilité du béton dans son ensemble.

A première vue, il peut sembler difficile d'évaluer l'influence

des caractéristiques de l'interface pâte-granulat sur les réactions alcalis-granulats. Les méthodes que nous envisageons à l'heure actuelle sont les suivantes:

1-Mesure de la perméabilité par la méthode décrite par Wakeley et Roy (1982);

2-La diffraction-X (Carles-Gibergues, 1985) et

3-La microscopie électronique à balayage.

Brièvement, la méthode de mesure perméabilité décrite par Wakeley et Roy (1982) s'applique à la perméabilité à l'interface coulis-roche. Il s'agit d'abord de fabriquer des échantillons avec une interface coulis-roche puis de carotter cet échantillon de façon à obtenir un échantillon cylindrique dont l'interface coulis-roche est perpendiculaire à l'échantillon. Par la suite, il s'agit de mesurer la perméabilité (à l'eau dans ce cas-ci) à l'aide d'un appareil approprié.

Carles-Gibergues (1985) a décrit une méthode astucieuse utilisée pour définir le degré d'orientation préférentielle et l'abondance des cristaux de $Ca(OH)_2$ au niveau de l'interface pâte-granulat. Le degré d'orientation plus élevé et la plus grande abondance du $Ca(OH)_2$ au niveau de l'interface pâte-granulat peut fournir des informations

indirectes sur la plus grande porosité-perméabilité au niveau de cette zone. La méthode utilisée consiste à fabriquer des échantillons avec un interface pâte-granulat plane et d'effectuer des diffractions-X sur la pâte en se rapprochant de l'interface par des abrasions successives. L'analyse des diffractogrammes obtenus permet de déterminer le degré d'orientation des cristaux de $Ca(OH)_2$ ainsi que leur abondance relative en fonction de la distance de l'interface.

Finalement, quoique qualitative, la microscopie électronique à balayage peut fournir quelques indications sur l'aspect de la zone de transition ainsi que sur la nature des phases présentes.

EXPLICATION DES FIGURES DES % DE VARIATION DES PARAMETRES EN FONCTION DU % D'AJOUT

Les valeurs (V) pour les différents paramètres sont obtenues en calculant la différence entre la valeur du paramètre pour l'échantillon avec ajout (A) et celle de l'échantillon de contrôle (B). Cette différence est divisée par la valeur de l'échantillon de contrôle et multipliée par 100.

V = (A-B/B) X 100 (% de réduction)

Une valeur négative indique une augmentation de la valeur du paramètre par rapport à celle de l'échantillon de contrôle.

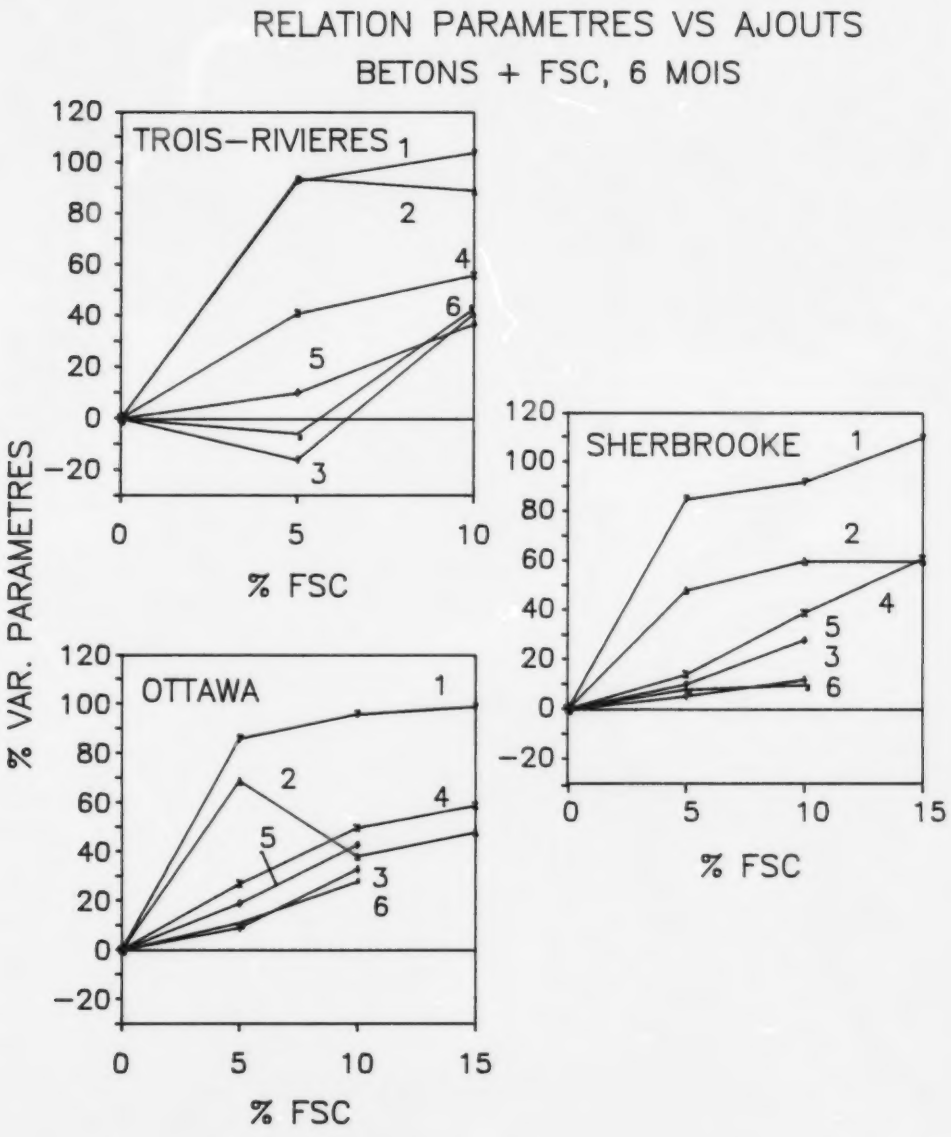


Fig. 94-Relation entre le pourcentage d'ajout et la variation des différents paramètres mesurés pour les bétons fabriqués avec les trois granulats et la FSC. (1-Réduction d'expansion, 2-Réduction de perméabilité, 3-Réduction de la teneur en ion K^+, 4-Réduction de la teneur en $Ca(OH)_2$, 5-Réduction de la teneur en ion OH^-, 6-Réduction de la teneur en ion Na^+)

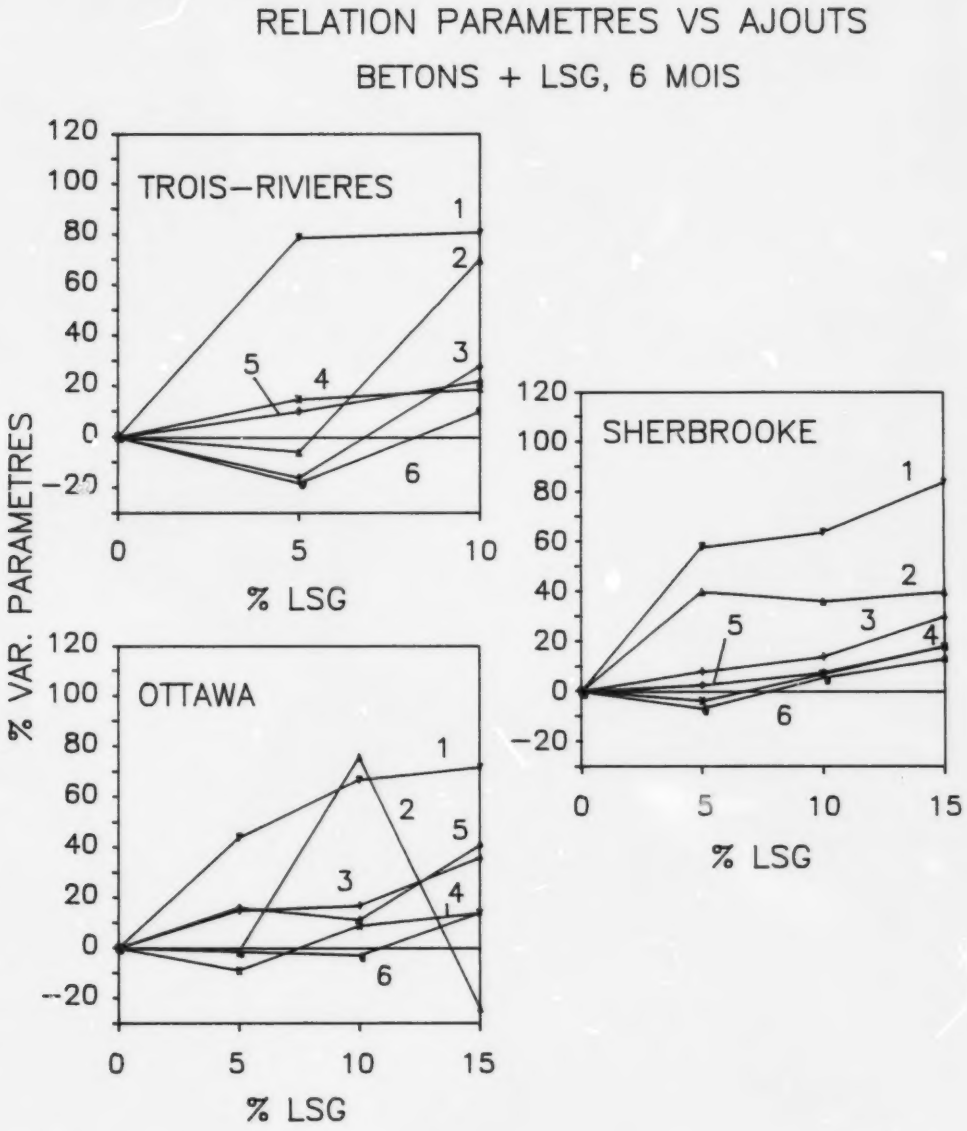


Fig. 95-Relation entre le pourcentage d'ajout et la variation des différents paramètres mesurés pour les bétons fabriqués avec les trois granulats et le LSG. (1-Réduction d'expansion, 2-Réduction de perméabilité, 3-Réduction de la teneur en ion K^+, 4-Réduction de la teneur en $Ca(OH)_2$, 5-Réduction de la teneur en ion OH^-, 6-Réduction de la teneur en ion Na^+)

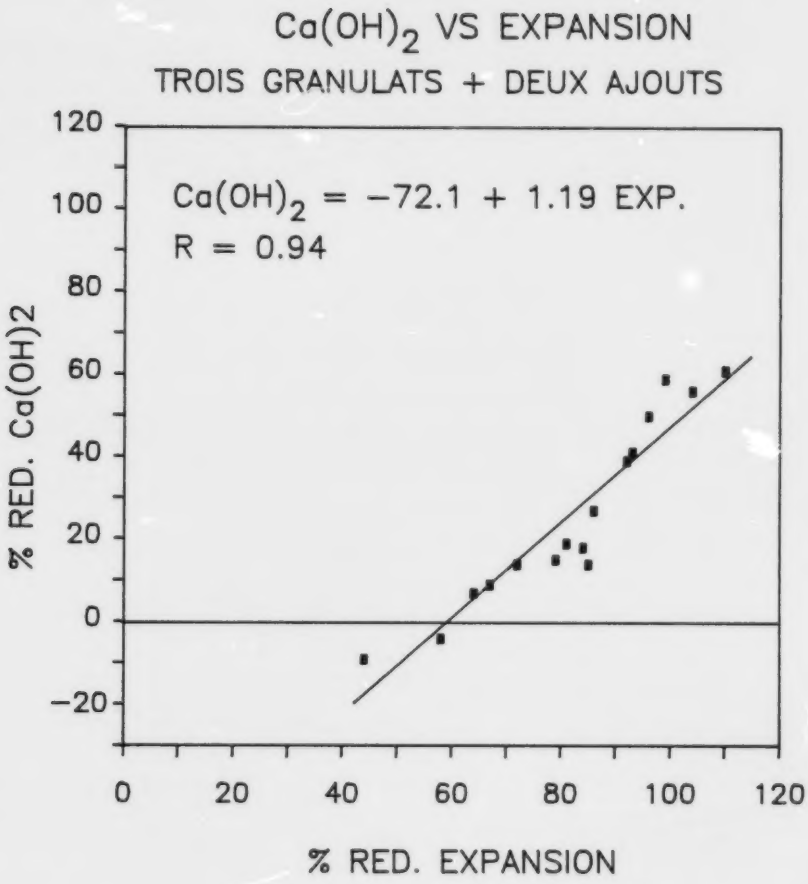


Fig. 96-Corrélation entre la réduction des teneurs en $Ca(OH)_2$ et la réduction des expansions. (Bétons, à 6 mois)

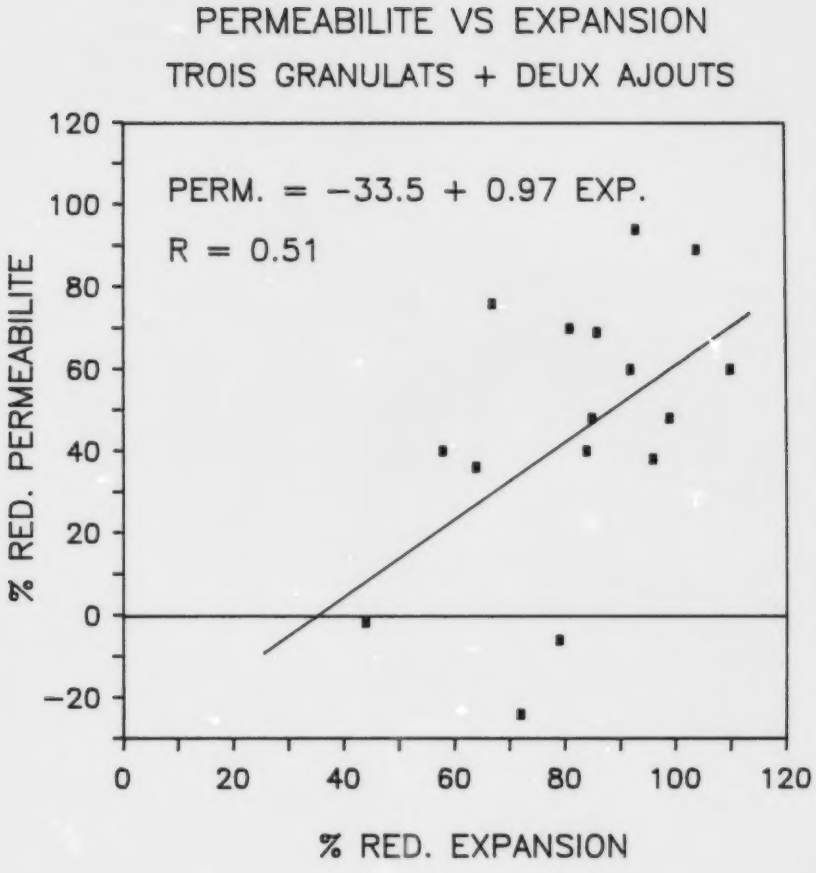


Fig. 97-Corrélation entre la réduction de la perméabilité à l'azote et la réduction des expansions. (Bétons, à 6 mois)

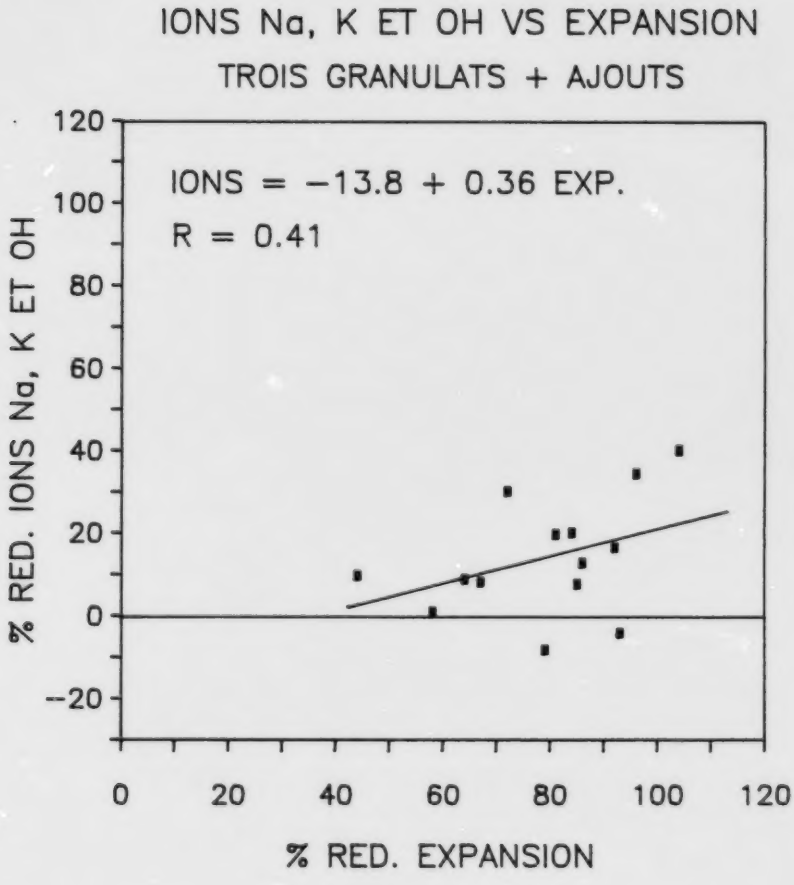


Fig. 98-Corrélation entre la réduction de la teneur en ions Na^+, K^+ et OH^- (moyenne des trois ions) et la réduction des expansions. (Bétons, à 6 mois)

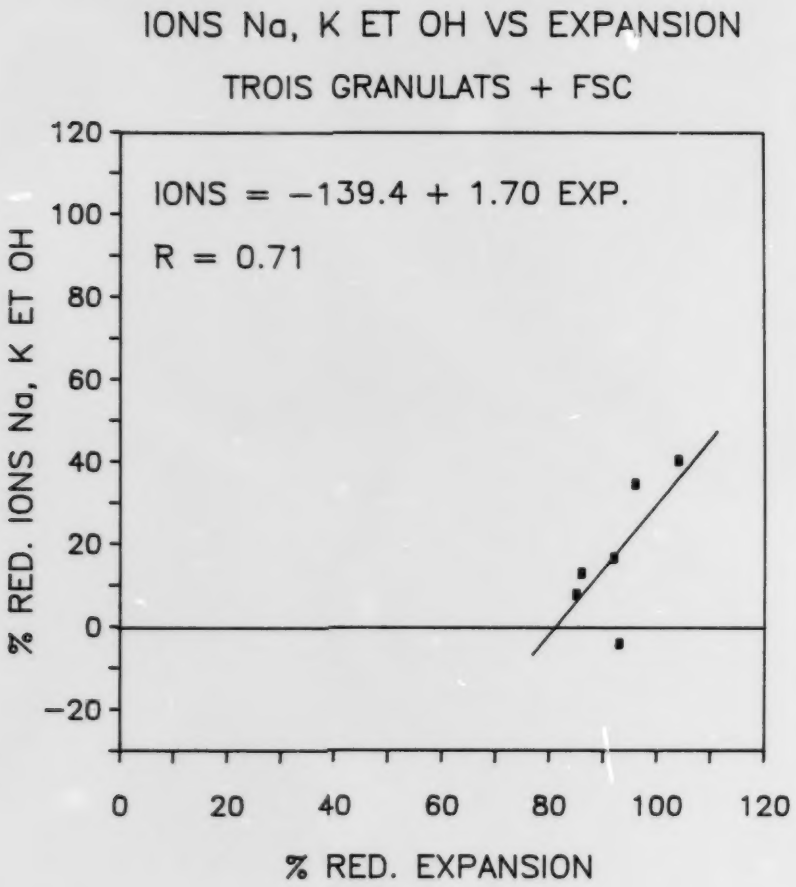


Fig. 99-Corrélation entre la réduction de la teneur en ions Na^+, K^+ et OH^- (moyenne des trois ions) et la réduction des expansions. (Bétons avec FSC, à 6 mois)

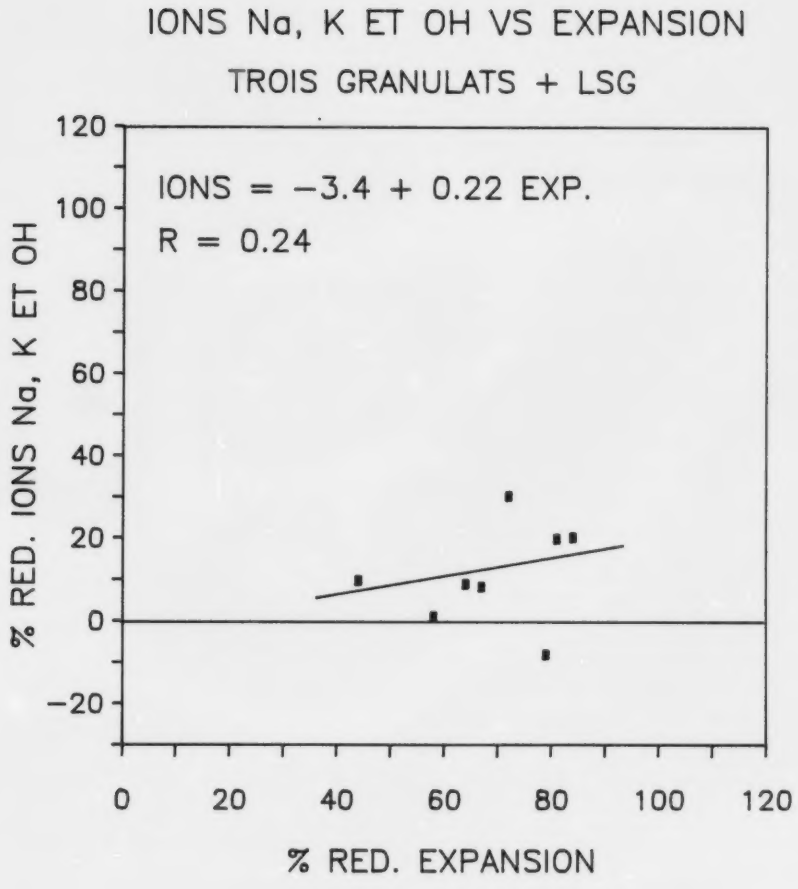


Fig. 100-Corrélation entre la réduction de la teneur en ions Na^+, K^+ et OH^- (moyenne des trois ions) et la réduction des expansions. (Bétons avec LSG, à 6 mois)

BIBLIOGRAPHIE

American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa. U.S.A., Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, 945 p. (1986).

-Norme ASTM C-289-81, Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method).

-Norme ASTM C-227-81, Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method).

-Norme ASTM C-311-85, Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.

-Norme ASTM C-618-85, Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.

-Norme ASTM C-494-86, Chemical Admixtures for Concrete.

-Norme ASTM C-143-78, Slump of Portland Cement Concrete.

American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa. U.S.A., Annual Book of ASTM Standards, Cement; Lime; Gypsum, 723 p. (1986).

-Norme ASTM C-114-85, Chemical Analysis of Hydraulic Cement.

Association Canadienne de Normalisation (ACNOR), Rexdale, Ont., Canada (1986) -Norme CAN3-A23.1-M77, "Concrete Materials and Methods of Construction", Supplement No.2 (1986).

-Norme CAN3-A23.2-M77, "Methods of Test for Concrete". Supplement No.2 (1986)

-Norme CAN3 A23.2-14A. "Expansion potentiel de la combinaison ciment-granulat".

-Norme CAN3 A-266.2-M78, "Adjuvants chimiques du béton."

Barneyback, R.S. Jr., et Diamond, S., "Expression and Analysis of Pore Fluids from Hardened Cement Pastes and Mortars". Cem. Concr. Res., Vol. 11, No. 2, pp. 279-285 (1981) Bakker, R.F.M., "Permeability of Blended Cement Concretes". ACI, S.P. 79-22, pp. 589-606 (1979).

Bakker, R.F.M., "About the Cause of the Resistance of Blastfurnace Cement Concrete to the Alkali-Aggregate Reaction". Proc. 5th Int. Conf. on Alk.-Agg. Reaction in Concr., S.A., Cape Town, Nat. Building Institute of CSIR, S252/29, 5 p. (1981).

Beaudoin, J.J., "Effect of Humidity and Porosity on Fracture of Hardened Portland Cement". Cem. Concr. Res., Vol. 12, No. 6, pp. 705-716 (1982).

Bérard, J., "Alkali-Silica Reactivity Case Histories in Quebec". C.S.A. A5 Seminar:Cement-Aggregate Reactivity, 19 Mai, 1982, Montréal, Québec, 9 p. (1982).

Bérard, J., "Etude pétrographique de granulats réactifs au Québec". Pésenté à l'atelier int. sur les réactions alcalis-granulats dans le béton et la réhabilitation des parcs de stationnement étagés en béton. ACNOR, Montréal, 15 Mai, 1985, 25 p. (1985).

Bérard, J. et Roux, R., "La viabilité des bétons aux Québec". Rev. Can. Gén. Civ., Vol. 13, pp. 12-24 (1986).

Bhatty, M.S.Y., "Mechanism of Pozzolanic Reactions and Control of Alkali-Aggregate Expansion". Cem. Concr. Agg., ASTM, Vol. 7, No. 2, pp. 69-77 (1985).

Bhathy, M.S.Y. et Greening, N.R. "Interaction of Alkalies with Hydration with Hydration and Hydrated Calcium Silicates". Proc. 4th Int. Conf. on the Effects of Alkalies in Cem. and Concr., Purdue, Ind., U.S.A. (1978).

Bisaillon, A., Laboratoire de Béton Limitée, 3420 Boul. St-Joseph Est, Montréal, Québec, Canada , H1X 1W6, communication personnel, 1986.

Blanc, M., "Etude générale de la méthode physique d'échange eau-méthanol". Mémoire présenté à l'Université de Paris sud, Centre d'Orsay pour l'obtention de l'attestation d'Etudes Industrielles Approfondies, 50 p. (1982),

Brunauer, S., "The Adsorption of Gazes and Vapours". Princeton University Press (1983).

Brunauer, S."Tobermorite Gel-The Heart of the Concrete" Am. Sci. Vol. 50, No.1, pp. 210-229 (1962).

Brunauer, S., Emmett, P.H. et Teller, E., "Adsorption of Gazes in Multimolecular Layers". J. Amer. Chem. Soc., 60, 309 (1938).

Brunauer, S., Older, S. et Yudenfreund, M., "The New Model of Hardened Portland Cement Paste". Highw. Res. Rec. No. 328, pp. 89-101 (1970).

Byfors, K., Hansson, C.M. et Tritthart, J., "Pore Solution Expression as a Method to Determine the Influence of Mineral Additives on Chloride Binding". Cem. Concr. Res., Vol. 16, No. 6, pp. 760-770 (1986).

Carles-Gibergues, A., "L'auréole de transition", Département de Génie Civil, I.N.S.A., Toulouse, France, communication personnelle. (1985).

Chatterji, S., "The Role of $Ca(OH)_2$ in the Breakdown of Portland Cement Concrete due to Alkali-Silica Reaction". Cem. Concr. Res., Vol. 9, No. 2, pp. 185-188 (1979).

Clark, T.H. et Globensky, Y., "Régions de Grondines". Rapport Géologique 154, Min. des Richesses Naturelles du Québec (1975).

Clark, T.H. et Globensky, Y., "Régions de Sorel et partie sud-est de St-Gabriel". Rapport Géologique 155, Min. des Richesses Naturelles du Québec (1976)[1].

Clark, T.H. et Globensky, Y., "Région de Trois-Rivières". Rapport Géologique 164, Min. des Richesses Naturelles du Québec. (1976)[2]

Copeland, L.E., Bodor, E., Chang, T.N. et Weise, C.H., "Reaction of Tobermorite Gel with Aluminates, Ferrites and Sulfates". PCA. Journal, R&D Lab., Vol. 9, No. 1, PCA Res. Bull. 211, pp. 61-74 (1967).

Copeland, L.E., Kantro, D.L. et Verbeck, G., "Chemistry of Hydration of Portland Cement". Proc. 4th Int. Symp. on the Chem. of Cem, PCA Bull. 153, Vol. 1, pp. 469-465 (1962).

Côté, F., "Etude de l'évolution chimique du liquide interstitiel de bétons contenant de la fumée de silice condensée". Rapport soumis comme condition partielle en vue de l'obtention d'un baccalauréat en sciences, Universtité de Montréal, Dépt. de géologie, Montréal, Québec, Canada, Avril 1987, 40 p. (1987).

Day, R.L., "Reactions between Methanol and Portland Cement Paste". Cem. Concr. Res., Vol. 11, No. 3, pp. 341-349 (1981).

Dent Glasser, L.S. et Kataoka, N., "On the Role of Calcium in the Alkali-Aggregate Reaction". Cem. Concr. Res., Vol. 12, No. 3, pp. 321-331 (1982).

Detwiler, R., Krishnan, K. et Metha, P., "Effect Of Granulated Blast Furnace Slag on the Transition Zone in Concrete", ACI, S.P. 100-6, Vol. 1, pp. 63-72 (1987).

Diamond, S., "A Critical Comparison of Mercury Porosimetry and Capillary Condensation Pore Size Distributions of Portland Cement Pastes". Cem. Concr. Res., Vol. 1, No. 5, pp. 531-545 (1971).

Diamond, S., "Cement Paste Microstructure- An Overview at Several Levels". Dans Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and Properties, Proc. of a Conf. held at University of Sheffield, April 8-9, 1976, Cem. and Concr. Ass., 334 p., pp. 2-30 (1976).

Diamond, S., "Effects of two Danish Flyashes on Alkali Contents of Pore Solutions of Cement-Flyash Pastes". Cem. Concr. Res., Vol. 11, No. 3, pp. 383-394 (1981).

Double, D.D. et Hellawell, A., "The Solidification of Cement". Sc. Am., June 1977, pp. 82-90 (1977).

Durand, B., "Le rôle des additifs minéraux dans les réactions alcalis-granulats". Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maître ES Sciences Appliquées (M.Sc.A.), Ecole Polytechnique, Dep. de Genie Minéral, Août 1985, Montréal, Québec, Canada, 199 p. (1985).

Durand, B. et Bérard, J., "Use of Gel Composition as a Criterion for Diagnosis of Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete Containing Siliceous Limestone Aggregate". Matér. Const. Mater. Struct., RILEM, No. 20, pp. 39-43 (1987).

Fagerlund, G. "Determination of Specific Surface by the BET Method". Matér. Const. Mater. Struct., RILEM (1980).

Feldman, R.F., "Significance of Porosity Measurements on Blended Cement Performance". ACI, S.P. 79-22, pp. 415-433 (1979).

Feldman, H.F. et Cheng-yi, H., "Resistance of Mortars Containing Silica Fume to Attack by a Solution Containing Chlorides". Cem. Concr. Res., Vol. 15, No. 3, pp. 411-420 (1985).

Feldman, R.F. et Cheng-yi, H. "Properties of Portland Cement-Silica Fume Pastes. I-Porosity and Surface Properties". Cem. Concr. Res., Vol. 15, No. 5, pp. 765-774 (1985).

Feldman, R.F. et Serada, P.J.,"A New Model of Hydrated Portland Cement and Its Practical Implications", Engng. J. (Can.) Vol. 53, No. 8/9, pp. 53-59 (1970).

Fournier, B. et Bérubé, M.-A., "Caractérisation des granulats calcaires exploités dans la région de Québec et évaluation de leur potentiel de réactivité alcaline". Rapport GGL 85-20, Université Laval, Juillet 1985, 207 p. (1985).

Gard J.A., Mohan, K. et Taylor H.F.W., "Analytical Electron Microscopy of Cement Pastes. I-Tricalcium Silicate Pastes". 79th Annual Meeting of Am. Cer. Soc., Chicago, Illinois, U.S., pp. 336-337 (1977).

Goto, S. et Roy, D.M., "The Effect of W/C and Curing Temperature on the Permeability of Hardened Cement Paste". Cem. Concr. Res., Vol. 11, No. 4, pp. 575-579 (1981).

Grattan-Bellew, P.E., "Preliminary Report on Potential Alkali-Aggregate Reactivity of Aggregate from the Hébert Quarry, Sherbrooke, Québec". NRC of Canada, June 1982, 8 p. (1982).

Hannant, D.J., "An Experimental Investigation of the Creep Mechanism in Concrete", dans Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, Proc. of the Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference, Partie 1 et 2, 10 p. (1969).

Helmuth, R. "Fly Ash in Cement and Concrete". PCA, Res. and Dev. Laboratories, Skokie, Ill., 203 p. (1987).

Houde, R., "Etude des granulats à béton réactifs aux alcalis de la région de Trois-Rivières". Memoire présenté en vue de l'obtention du grade de maître es sciences appliquées (M.Sc.A), Ecole Polytechnique, Montréal, Mars 1986, 221 p. (1986).

Ishai, O., "Time Dependant Deformational Behavior of Cement Paste, Mortar and Concrete". Proc. of an Int. Conf. held in London, Setp. 1965, Cem. Concr. Ass., pp. 345-349 (1965).

Jawed, I. et Skalny, J., "Alkalies in Cement: A Review". Cem. Concr. Res., Vol. 7, No. 6, pp. 719-730 (1977).

de Jong, J.J.M. et Stevels, J.M., "Hydration of Tricalcium Silicate". J. Appl. Chem., Vol. 17, pp. 246-250 (1967).

Kantro, D.L., Brunauer, S., et Wise, C.H., "Development of Surface in the Hydration of Calcium Silicates". Dans Solid Surfaces and the Gas-Solid Interface, Advance in the Chemistry Series 33, PCA Res. Bull. 140, pp. 199-219 (1961).

Kasai, Y., Matsui, I., Fukushima, Y. et Kamohara, H., "Air Permeability and Carbonation of Blended Cement Mortars". ACI S.P. 79-23, pp. 435-451 (1979).

Lachowski, E.E., Mohan, K. et Taylor, H.F.W., "Analytical Electron Microscopy of Cement Pastes. II-Pastes of Portland Cement and Clinkers". J. Am. Cer. Soc., Vol. 63, No. 7-8, pp.447-452 (1980).

Lambert, P., Page, C.L. et Short, N.R., "Pore Solution Chemistry of Hydrated System Tricalcium Silicate/Sodium Chloride/Water". Cem. Concr. Res., Vol. 15, No. 4, pp. 675-680 (1985).

Laurin, P. "Etude préliminaire des possibilités de valorisation d'un laitier de phosphore de source québecoise". Rapport soumis comme condition partielle en vue de l'obtention d'un baccalauréat en génie, Ecole Polytechnique de Montréal, Dépt. de génie minéral, Montréal, Québec, Canada, Avril 1987, 47 p. (1987).

Lawrence, C.D. et Gimblett, F.R.G., 1980. "Etude porométrique de ciments hydratés par adsorption de N_2 et de n-C_4H_{10}". 7ème Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 3, pp. 141-146. (1980).

Lehoux, P., Ciment Canada Lafarge Ltée, 6150 Ave. Mont Royal, Montréal, Québec, Canada, H4P 2R3, communication personnelle, 1987.

Litvan, G.G. et Myers, R.E., "Surface Area of Cement Paste Conditioned at Various Humidities". Cem. Concr. Res., Vol. 13, No. 1, pp. 46-60. (1983).

Longuet, P, Burglen, L. et Zewler, A., "The Liquid Phase of Hydrated Cement". Rev. Mat. Constr., Mtér. Const. Mater. Struct., RILEM, No. 676, pp. 35-41 (1973).

Maso, F., Proc. of the 7th Int. Cong. on the Chemistry of Cement, Vol. 1, ed. Septima, Paris (1980) dans Metha (1986).

Metha, P.K., "Concrete: Structure, Properties and Materials". Prentice-Hall International Series in Civil Engineering Mechanics, éd. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, (1986).

Metha, P.K. et Manmohan, D., "Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes". 7ème Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 7, pp. 1-5 (1980).

Midgley, H.G. et Illiston, J.M., "Some Comments on the Microstructure of Hardened Cement Pastes". Cem. Concr. Res., Vol. 13, No. 2, pp. 197-206 (1983).

Midgley, H.G. et Illiston, J.M., "The Penetration of Chlorides into Hardened Cement Pastes". Cem. Concr. Res., Vol 14, No. 4, pp. 546-558 (1984).

Mills, R., "Mass Transfer of Gas and Water through Concrete", ACI, S.P. 100-36, Vol. 1, pp. 621-644 (1987).

Mindess, S. et Young, J.F., "Concrete", Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, éd. Printice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, (1981).

Ming-shu, T. et Su-fen, H., "Effect of $Ca(OH)_2$ on Alkali-Silica Reaction". 7ème Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 2, pp. 94-99 (1980).

Ming-shu, T., Yu-feng, Y., Mei-qi, Y. et Shi-hua, Z., "The Preventive Effect of Mineral Admixtures on Alkali-Silica Reaction and its Mechanism". Cem. Concr. Res., Vol. 13, No. 2, pp. 171-176 (1980).

Montgomery, D.G., Hugues, D.C. et Williams, R.I.T., "Fly Ash in Concrete-A Microstructure Study". Cem. Concr. Res., Vol. 11, No. 4, pp. 591-603 (1980).

Nagataki, S. et Ujike, I., "Air Permeability of Concrete Mixed with Fly Ash and Condensed Silica Fume". ACI S.P. 91-52, pp. 1049-1068 (1986).

Neville, A.M., "Properties of Concrete", éd. Longman Scientific and Technical, England, 3ème édition, 780 p., Chap. 7, pp. 433-443 (1983).

Nyame, B.K. et Illiston, J.M., "Capillary Pore Structure and Permeabilbity of Hardened Cement Paste". 7ème Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 6, pp. 181-185 (1980).

Oberholster, R.E. et Davies, G., "An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates", Cem. Concr. Res., Vol. 16, No. 2, pp. 181-189 (1986).

Older, I. et Robler, M., "Investigations on the Relationship between Porosity, Structure and Strength of Hydrated Portland Cement Pastes. II-Effect of Pore Structure and of Degree of Hydration". Cem. Concr. Res., Vol. 15, No. 3, pp. 401-410 (1985).

Older, I. et Wonnemann, R., "Effect of Alkalies on Portland Cement Hydration. II-Alkalies Present in the Form of Sulfates". Cem. Concr. Res., Vol. 13, No. 6, pp. 771-777 (1983)[1].

Older, I. et Wonnemann, R., "Effect of Alkalies on Portland Cement Hydration. I-Alkalies Incorporated into the Cristalline Lattice of Clinker Minerals". Cem. Concr. Res., Vol. 13, No. 4, pp. 477-482 (1983)[2].

Osbaeck, B. et Jons, E.S., "The Influence of Content and Distribution of Alkalies on the Hydration Properties of Portland Cement". 7ème Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 2, pp. 135-140 (1980).

Parcevaux, P., "Pore size Distribution of Portland Cement Slurries at Very Early Stages of Hydration (Influence of Curing Temperature and Pressure)". Cem. Concr. Res., Vol. 14, No. 3, pp. 419-430 (1984).

Parrott, L. J., "Effect of Drying History upon the Exchange of Pore Water and upon Subsequent Methanol Sorption Behavior in Hydrated Alite Paste". Cem. Concr. Res., Vol. 11, pp. 651-658 (1980).

Parrott, L.J., "Thermogravimetric and Sorption Studies of Methanol Exchange in an Alite Paste". Cem. Concr. Res., Vol. 13, No. 1, pp. 18-22 (1983).

Parrott, L.J., Hansen, W. et Berger, L., "Effect of First Drying upon the Pore Structure of Hydrated Alite Paste". Cem. Concr. Res., Vol. 10, pp. 647-655 (1980).

Patel, R.G., Parrott, L.J., Martin, J.A. et Killoh, D.C., "Gradients of Microstructure and Diffusion Properties in Cement Paste Caused by Drying". Cem. Concr. Res., Vol. 15, No. 2, pp. 343-356 (1985).

Pollitt, W.W. et Brown, W, "The Distribution of Alkalies in Portland Cement Clinker". 5th Int. Symp. on the Chem. of Cem., Tokyo, Japan, Supp. Paper I-126, pp. 322-333 (1964).

Powers, T.C., The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete, Bull. No. 90, Portland Cement Association, Skokie, Ill. (1958).

Powers, T.C., "Some Observations on the Interpretation of the Creep Data", Rilem No. 33, Décembre 1966, pp. 381-392 (1966).

Rayment, P.L., "The Effect of Pulverised-Fuel Ash on the C/S Molar Ratio and Alkali Content of Calcium Silicate Hydrates in Cement". Cem. Concr. Res., Vol. 12, No. 2, pp. 133-140 (1982).

Rayment, D.L. et Lachowski, E.E., "The Analysis of OPC Pastes: A Comparison between Analytical Electron Microscopy and Electron Probe Microanalysis". Cem. Concr. Res., Vol. 14, No. 1, pp. 43-48 (1984).

Rayment, D.L. et Majumdar, A.J., "The Composition of CSH Phase(s) in Hydrated C_2S Paste". 7th Int. Cong. on the Chem. of Cem., Vol. 2, pp. 64-70 (1980).

Regourd, M., Hornain, H. et Poitevin, V., "The Alkali-Aggregate Reaction: Concrete Microstructural Evolution". Proc. 5th Int. Conf. on Alk.-Agg. Reaction in Concr., S.A., Cape Town, Nat. Building Institute of CSIR, S252/35, 10 p. (1980).

Ruetz, W., "A Hypothesis for the Creep of Hardened Cement Paste and the Influence of Simultaneous Shrinkage", dans The Structure of Concrete, Proc. of an International Conference, London, Septembre 1965, Cem. and Concr. Ass., pp. 365-387 (1965).

Sabri, S. et Illiston, J.M., "The Distribution of Evaporable Water in Hardened Cement Paste (H.C.P.)". 7ème Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 6, pp. 52-56 (1980).

Seligmann, P. et Greening, N.R., "Phase Equilibrium of Cement Water". Proc. 5th Int. Symp. on the Chem. of Cem., Tokyo, Japan, Cem. Ass. of Japan, 1969, Vol. 2, pp.177-199 (1968).

Sellevold, E.J., "Condensed Silica Fume in Concrete: A World Review", Int. Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, CANMET, Montreal, pp. 1-77, (1987).

Shi, D. et Winslow, D.N., "Contact Angle and Damage During Mercury Intrusion into Cement Paste". Cem. Concr. Res., Vol. 15, No. 4, pp. 645-654 (1985).

Shin, G.Y. et Glasser, F.P., "Chemistry of the Pore Fluids. I-Suspension Reactions $Ca_{3-x}.Na_{2x}.Al_2O_3$ Solid Solutions with and without Gypsum Additions", Cem. Concr. Res., Vol. 13, No. 3, pp. 366-376 (1983).

Sierra, R., "Répartition des différentes formes d'eau dans la structure de pâtes pures de C_3S et de ciment portland". 7ème Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 6, pp. 201-206 (1980).

Slate, F.O. et Meyers, B.L.. "Some Physical Processes Involved in Creep of Concrete", dans Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, Proc. of the Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference, Partie 1 et 2, 5 p. (1969).

St-Julien, P., "Carte de la région d'Orford-Sherbrooke, Contés de Richmond, Sherbrooke, Shefford, Brome, Stanstead et Compton". Préparée par le service de cartographie, 1970, Min. des Richesses Naturelles du Québec, Direction Générales des Mines (1965).

St-Julien, P. et Lamarche, R.Y., "Géologie de la région de Sherbrooke". Min. des Richesses Naturelles du Québec, Rapport Préliminaire No. 530, 36 p. (1965).

Takameto, K. et Uchikawa, H., "Hydration of Pozzolanic Cement". 7ème Cong. Int. sur la Chimie du Ciment, Paris, Vol. 1, pp. IV-2/1-29 (1980).

Taylor, H.F.W. et Newbury, "Calcium Hydroxide Distribution and Calcium Silicate Hydrate Composition in Tricalcium Silicate and B-Dicalcium Silicate Pastes". Cem. Concr. Res., Vol. 14, No. 1, pp. 93-98 (1984).

Thomas, N.L. et Double, D.D., "Calcium and Silicon Concentrations in Solution During the Early Hydration of Portland Cement and Tricalcium Silicate". Cem. Concr. Res., Vol. 11, pp. 675-687 (1981).

Vennesland, O. et Gjorv, O.E., "Silica Concrete-Protection Against Corrosion of Embedded Steel". ACI, S.P. 79-22, pp. 719-723 (1979).

Wakeley, L.D. et Roy, D.M., "A Method for Testing the Permeability between Grout and Rock". Cem. Concr. Res., Vol. 12, No. 4, pp. 533-534. (1982).

Watson, K.L., "A Simple Relationship Between the Compressive Strength and Porosity of Hydrated Portland Cement". Cem. Concr. Res., Vol. 11, No. 3, pp. 473-476. (1981).

Wittmann, F.H. et Englert, G., Mat. Sci. Eng., Vol. 2, No. 14 (1967) dans Diamond, S., "A Critical Comparison of Mercury Porosimetry and Capillary Condensation Pore Size Distributions of Portland Cement Pastes". Cem. Concr. Res., Vol. 1, No. 5, pp. 531-545 (1971).

Wittmann, F.H., "Cement Production and Use", Publication No. 79-08, Engng Foundation, New York, pp. 143-161 (1979).

ANNEXE A

DESCRIPTION DES ESSAIS D'EXPANSION

A.1- CARACTERISTIQUES DES MELANGES

A.1.1- MATERIAUX UTILISES

CIMENT: PORTLAND TYPE 10 (Voir le tableau A.1)

EAU: DISTILLEE

SABLE: ST-FELIX DE VALOIS, LANAUDIERE, Qc
McWATTERS, TEMISCAMINGUE, Qc

(Voir le tableau A.2)

ADDITIF CHIMIQUE: SUPERPLASTIFIANT
SULFONATE DE NAPHTALENE

(Voir le tableau A.3)

GRANULATS: -CALCAIRE DE TROIS-RIVIERES, Qc
-CALCAIRE D'OTTAWA, Ont.
-SCHISTE CHLORITEUX DE SHERBROOKE, Qc

(Voir le tableau A.4)

AJOUTS MINERAUX: (Voir le tableau A.1)

A.1.2- PROPORTIONS DES MELANGES*

CIMENT** + AJOUT MINERAL = 310 kg/m³

RAPPORT EAU/CIMENT + AJ. MIN. = 0.5

RAPPORT SABLE/GRANULAT = 0.66

$$\text{RAPPORT } \frac{\text{CIM. + AJ. MIN.}}{\text{SABLE + GRAN.}} = 0.16$$

*Une fiche d'un mélange type est donnée à la page 258.
**La teneur en Na_2O équ. du ciment est augmentée à une teneur de 1.25% par addition de NaOH à l'eau de gâchage.

A.2- CARACTERISTIQUES DE LA CURE

24 PREMIERES HEURES A 23 °C, 95% D'H.R.

APRES, 38°C DANS DES CONTENANTS SCELLES DONT LES PAROIS SONT RECOUVERTES D'UN TISSU ABSORBANT.
(Voir la figure A.6)

A.3- MODE OPERATOIRE

Les granulats, le ciment et les ajouts sont prémélangés à sec dans le malaxeur. Il s'agit d'un petit malaxeur à tambour à trois pales, incliné, d'une capacité d'environ 0.1 m³. L'agent superplastifiant et le NaOH sont ajoutés à l'eau quelque temps avant d'être ajoutée au mélange.

Le malaxage dure environ 6 minutes. A 4 minutes, l'affaissement est mesuré par la méthode du cône (ASTM C-143). Le mélange est ensuite placé dans 3 moules prismatiques de 75 X 100 X 300 mm (3 X 4

X 12 po.) et 2 moules cylindriques de 300 mm de haut et 150 mm de diamètre. Après la mise en place du mélange, les échantillons sont enveloppés dans des sacs en plastique puis placés dans une chambre à 23 °C et à 95% d'humidité relative.

Après 24 heures, les prismes et les cylindres sont démoulés. Les prismes sont ensuite placés dans de l'eau à température ambiante pendant 30 minutes puis ils sont mesurés à l'aide d'un dilatomètre précis au 3/1000 de millimètre (pour une course de 30 mm). Après la mesure initiale, les prismes sont placés dans des chaudières de plastique d'une capacité de 20 litres (voir la figure A.8). Ils sont par la suite mesurés périodiquement sur une période pouvant atteindre 1 an.

Les cylindres sont placés dans le même type de chaudières utilisées pour les prismes. Un des cylindre est testé en compression à l'âge de 28 jours tandis que l'autre sert à l'essai de perméabilité à l'azote à l'âge de 6 mois.

A.4- REMARQUE

Les niveaux de remplacement des ajouts sont les pourcentages poids des ajouts par rapport à la quantité de ciment du mélange de contrôle.

Ex.: Si le mélange de contrôle = 10 kg de ciment,

le mélange 10% FSC = 9 kg de ciment + 1 kg de FSC

A.5- DESCRIPTION DETAILLEE DES GRANULATS

A.5.1- LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES

DESCRIPTION PETROGRAPHIQUE:

Le granulat de Trois-Rivières est un calcaire à grain fin, très peu argileux, avec des zones très riches en fossiles. Certains de ces fossiles sont en silice (Ex.: des spicules d'éponges) et d'autres sont partiellement silicifiés (Ex.: certains brachiopodes). Des fossiles phosphatés sont également présents. (Voir la figure A.1 pour les caractéristiques texturales du granulat en lame mince)

COMPOSITION MINERALOGIQUE:

Des analyses effectuées par diffraction des rayons X donnent la composition minéralogique suivante:

ROCHE ENTIERE: CALCITE EN MAJEURE PARTIE

RESIDUS INSOLUBLES: 4% A 13% SELON LES HORIZONS
ILLITE, QUARTZ, FELDSPATHS, CHLORITE,
DOLOMITE, CHERT, PHOSPHATE ET PYRITE

Le granulat de Trois-Rivières est très riche en carbonate de calcium ($CaCO_3$) et sa partie insoluble à l'HCl dilué contient principalement de l'illite, des grains de quartz et de feldspaths ainsi qu'un peu de chlorite, de dolomite et de pyrite. La partie insoluble contient également des fossiles en silice tels des spicules d'éponges et des brachiopodes partiellement silicifiés. Des fossiles contenant du phosphore sont également présents (probablement des scolécodontes).

DISTRIBUTION:

Le granulat de Trois-Rivières provient du Membre de St-Casimir de l'Ordovicien moyen qui fait partie de la Formation de Neuville du Groupe de Trenton. Le Membre de St-Casimir est l'équivalent stratigraphique du Membre de St-Michel de la Formation de Montréal de la région de Montréal (Clark et Globensky, 1975, 1976[1-2]).

Le granulat utilisé provient de la carrière St-Maurice située au nord de la ville de Trois-Rivières. Les échantillons proviennent de blocs prélevés au fond de la carrière. Ils ont été choisis en fonction de leur potentiel de réactivité aux alcalis. En effet, pour cette étude, il importait que les échantillons de contrôle montrent des expansions notables afin de bien établir les effets des ajouts minéraux sur les expansions dues aux réactions alcalis-granulats.

L'historique de la réactivité aux alcalis de ce granulat est disponible dans Durand (1985). Des informations sont également disponibles dans Bérard (1982), Bérard (1985), Bérard et Roux (1986), Houde (1987) et Durand et Bérard (1987).

A.5.2- LE GRANULAT D'OTTAWA

DESCRIPTION PETROGRAPHIQUE:

Le granulat d'Ottawa est un calcaire semblable à celui de Trois-Rivières; leurs compositions chimiques sont d'ailleurs très semblables. Il s'agit d'un calcaire à grain fin, très peu argileux, avec des zones très riches en fossiles. Certains de ces fossiles sont siliceux (Ex.: des spicules d'éponges) et d'autres sont partiellement silicifiés (Ex.: certains brachiopodes). (Voir les figures A.2 et A.3 pour les caractéristiques texturales du granulat en lame mince)

La réactivité aux alcalis du granulat d'Ottawa est comparable à la réactivité du granulat de Trois-Rivières. Le type de réaction alcalis-granulats qui se produit est cependant le même, i.e., du type alcalis-silice dans les calcaires siliceux. Le mode de formation et la composition du gel silico-calco-alcalin qui est produit par la réaction sont les mêmes que ceux du granulat de Trois-Rivières et leurs équivalents à Montréal et à Québec (Durand et Bérard, 1987 et Bérubé et Fournier, 1986).

COMPOSITION MINERALOGIQUE:

Des analyses effectuées par diffraction des rayons X donnent la composition minéralogique suivante:

ROCHE ENTIERE: CALCITE EN MAJEURE PARTIE

RESIDUS INSOLUBLES: 4% A 13%, SELON LES HORIZONS

ILLITE, QUARTZ, FELDSPATHS,
DOLOMITE, CHERT, PHOSPHATE ET PYRITE

Le granulat d'Ottawa est très riche en carbonate de calcium ($CaCO_3$) et sa partie insoluble à l'HCl dilué contient principalement de l'illite, des grains de quartz et de feldspaths ainsi qu'un peu de dolomite et de pyrite. La partie insoluble contient également des fossiles siliceux tels des coquilles de brachiopodes. La coupe stratigraphique de la carrière Spratt indique la présence de nodules de chert dans certains lits (Rogers, com. pers. 1988).

DISTRIBUTION:

Le granulat d'Ottawa provient de la Formation Bobcaygeon de l'Ordovicien moyen (Black River) et qui est approximativement équivalent aux Formations Leray, Ouareau, Mile End et Deschambault de

la région de Montréal (Rogers, com. pers. 1988).

Le granulat utilisé provient de la carrière Spratt située dans la région d'Ottawa. Les échantillons proviennent d'une pile de réserve spécialement préparée par le Ministère des Transports et Communications de l'Ontario pour servir à des études comparatives inter-laboratoires.

A.5.3- LE GRANULAT DE SHERBROOKE

DESCRIPTION PETROGRAPHIQUE:

Le granulat de Sherbrooke est un schiste métamorphique vert, chloriteux, riche en grains fins de quartz, de feldspaths et de séricite. Il contient également de l'épidote, de l'actinote, de la hornblende, de la calcite, de la magnétite et de la pyrite. (Voir les figures A.4 à A.5 pour les caractéristiques texturales du granulat en lame mince)

La composition de ce granulat varie d'une particule à une autre car la roche utilisée pour fabriquer ces granulats est elle-même hétérogène. Le schiste vert (méta-basalte) est le plus abondant. Certaines particules sont nettement plus riches que d'autres en quartz-feldspaths-calcite car ces fragments proviennent très probablement d'intrusions de diorites carbonatées. Il y également des

fragments riches en feldspaths et séricite provenant probablement de métarhyolites.

La partie réactive de ce granulat est très probablement le quartz et microquartz à grain fin et dont les bordures sont floues. lorsqu'observés au microscope polarisant. Grattan-Bellew (1982) rapporte que d'après des essais de prismes de béton (norme CSA A23.2-14A à 38°C), ce granulat est réactif aux alcalis (le 0.04% d'expansion a nettement été dépassé avant 12 mois). Il attribue la réactivité du granulat Hébert à la présence de petits grains de quartz (15-60 um) présentant en plus une extinction roulante au microscope polarisant (20-50°).

COMPOSITION MINERALOGIQUE:

La composition minéralogique est variable. D'après les observations en lame mince, les minéraux présents sont:

PRINCIPAUX MINERAUX: CHLORITE, QUARTZ, FELDSPATHS, SERICITE, CALCITE.

MINERAUX MOINS ABONDANTS: ACTINOTE, HORNBLENDE, MAGNETITE, PYRITE, EPIDOTE

DISTRIBUTION:

Le granulat de Sherbrooke provient la Formation d'Ascot de l'Ordovicien moyen localisée selon une bande NE-SO centrée sur la

ville de Sherbrooke (St-Julien, 1965 et St-Julien et Lamarche, 1965).

Le granulat utilisé provient d'une pile de réserve de la carrière Hébert située dans la région de Sherbrooke.

A.6- DESCRIPTION DETAILLEE DES AJOUTS MINERAUX

A.6.1- LA FUMEE DE SILICE CONDENSEE DE BECANCOUR, Qc

La fumée de silice condensée utilisée pour cette étude provient d'une usine de silicium et de ferro-silicium située dans le parc industriel de Bécancour, au sud de Trois-Rivières, Québec. L'usine est équipée pour récolter cette fumée de silice à l'aide de précipitateurs électrostatiques. La fumée de silice récoltée est conservée dans un entrepôt construit à cette fin. La compagnie commercialise cette fumée de silice et la vend à un prix comparable au prix du ciment.

Des essais de résistance en compression effectués a l'aide de cylindres 150 mm X 300 mm révèlent que la fumée de silice utilisée donne des résistances en compression à 28 jours de beaucoup supérieures aux échantillons de contrôle, c'est-à-dire, sans FSC (voir le tableau A.5). Pour connaître plus de détails concernant la fumée de silice condensée, consultez Durand (1985), chap. VII.

A.6.2- LE LAITIER SILICATE

Le laitier silicaté granulé utilisé pour cette étude provient d'une usine qui produit du phosphore. Cette usine est située à Varennes, au sud-est de Montréal, Québec. Actuellement, pour une tonne de phosphore produit, la compagnie produit 10 tonnes de laitier. La production annuelle de laitier est actuellement de 200 000 tonnes (1987) et les réserves de 1986 étaient de 500 000 tonnes.

Refroidi lentement, le laitier cristallise en formant principalement de la pseudo-wollastonite ($CaSiO_3$, Laurin, 1987) et des feldspaths. Le laitier est extrait du bassin de refroidissement à l'aide d'une pelle mécanique et empilé sous forme de blocs de 75 mm à 100 mm dans une pile de réserve située aux abords du pavillon administratif de l'usine. La majeure partie du laitier silicaté est recueillie sous cette forme, i.e., sous forme de scories grisâtres, faiblement à moyennement poreuse.

Une petite partie du laitier silicaté est sous forme granulé. Pour ce faire, il a été refroidi rapidement à l'aide de jets d'eau, tandis que normalement, on le laisse lentement refroidir à l'air. Le laitier granulé se présente sous la forme de granules d'un diamètre maximum d'environ 3 mm qui demeurent non-cohésives mêmes si exposées à la pluie. Pour notre étude, nous avons prélevé un échantillon de ce laitier et nous l'avons broyé pour qu'il atteigne une surface

spécifique de l'ordre de 300 m^2/kg. Une analyse par diffraction des rayons X du laitier granulé broyé révèle une teneur élevée en matériel amorphe ou semi-amorphe (léger arrondi du bruit de fond sur le patron de diffraction) et de quelques phases cristallines.

Des essais de résistance à la compression effectués à l'aide de cylindres 150 mm X 300 mm révèlent que le laitier silicaté donne des résistances à 28 jours légèrement supérieures à celles des échantillons de contrôle (voir le tableau A.5). Pour en savoir plus sur les laitiers et le laitier utilisé, consultez Durand (1985), chap. VII et Laurin (1987).

A.7- LES AUTRES AJOUTS

Lors de la présente étude, à titre exploratoire, nous avons mis à l'essai plusieurs ajouts, minéraux ou chimiques. Nous en faisons ici une brève description. Nous présentons les caractéristiques physiques et chimiques des ajouts minéraux au tableau A.5.

A.7.1- La poussière de quartz

Nous avons utilisé un résidu de quartz d'une compagnie de St-Canut (Qc). Une analyse par diffraction des rayons X nous a permis de constater qu'il s'agit d'un résidu presqu'exclusivement composé de quartz. Ce résidu, que nous nommons poussière de quartz, est

constitué de 96.9% de SiO_2 et sa teneur en alcalis totale est de 0.27%. Les résultats des essais d'expansion pour ce résidu sont présentés au chapitre V.

A.7.2- Le résidu d'une aciérie productrice d'acier inoxydable

Nous avons utilisé un résidu d'une compagnie productrice d'acier inoxydable située dans la région de Tracy (Qc). Il s'agit d'un laitier cristallin particulièrement riche en MgO et en Cr_2O_3. Nous avons nommé ce résidu "laitier AI" pour laitier Acier Inoxydable.

A.7.3- Le résidu d'une aciérie

Nous avons utilisé un résidu produit par une usine productrice d'acier de la région de Sorel (Qc). Il s'agit d'une aciérie et non d'une fonderie qui produit habituellement un résidu appelé laitier de haut fourneau. L'usine utilise comme matière première de la ferraille recyclée et c'est ce qui explique qu'elle produit un laitier pauvre en CaO comparativement à une fonderie. Ce laitier est également riche en fer et en magnésium. Un tel laitier ne possède pas de propriétés hydrauliques comme les laitiers de haut fourneau. Une analyse par diffraction des rayons X a permis de constater qu'il s'agit d'un résidu cristallin avec une certaine proportion de verre.

A.7.4- La poussière calcaire

Nous avons utilisé la pierre de la carrière St-Maurice (même carrière que le granulat de Trois-Rivières) sous forme de pousière. Il s'agit donc d'une poussière très riche en calcite avec de faibles proportions de quartz, feldspaths, illite, chlorite, dolomite, chert, phosphate et pyrite.

A.7.5- Les ajouts chimiques

Nous avons également utilisé du carbonate de lithium, de la silice colloïdale en phase aqueuse et du NaOH à titre d'ajouts chimiques. Etant donné les petites quantités utilisées, nous avons simplement additionné ces ajouts chimiques au mélange de contrôle sans en modifier les proportions. Les quantités d'ajout sont données en pourcentage en poids du ciment dans le mélange.

La silice colloïdale en phase aqueuse que nous avons utilisée contient 30% de SiO_2. Le pourcentage d'addition de la silice colloïdale en phase aqueuse pour nos essais d'expansion est donné en terme de pourcentage de SiO_2 équivalent et non pas en terme de pourcentage de liquide ajouté.

TABLEAU A.1: CARACTERISTIQUES DU CIMENT ET DES AJOUTS MINERAUX

	CIMENT	FUMEE DE SILICE	LAITIER SILICATE GRANULE
CaO	61.29	0.43	46.10
SiO_2	21.83	91.85	45.91
Al_2O_3	4.10	0.49	2.41
Fe_2O_3	2.89	1.35	1.23
MgO	2.66	0.49	1.34
Na_2O	0.36	0.14	0.17
K_2O	0.85	0.76	0.83
SO_3	3.24	1.35	0.18
TiO_2	0.20	0.009	0.06
P_2O_5	0.21	0.005	1.06
MnO	0.05	0.05	0.027
P. au feu	2.22	3.72	0.00
TOTAL	99.69	99.31	99.31
ALCALIS TOTAUX	0.92	0.64	0.71
SOLUBLES*	0.52	0.25	0.004
DISPONIBLES**	0.44	0.08	0.29
SURFACE SPEC. BLAINE (m^2/kg)	404	20 000	315
DENSITE	3.13	2.20	2.93

* Norme ASTM C-114
** NORME ASTM C-311

TABLEAU A.2: CARACTERISTIQUES DES SABLES

	McWATTERS TEMISC. (Qué.)	ST-FELIX DE VALOIS LANAUD. (Qué.)
ORIGINE	NATURELLE (GRAVIERE)	NATURELLE (GRAVIERE)
TYPE	META-VOLC. META-SED.	GRANITIQUE
MODULE DE FINESSE	2.5	2.7
DENSITE	2.64	2.70
ASTM C-227	NEGATIF (voir annexe I)	NEGATIF (voir annexe I)
ASTM C-289 INSOL.	Rc=40 Sc=37	- -

TABLEAU A.3: CARACTERISTIQUES DU SUPERPLASTIFIANT

TYPE	SULFONATE DE NAPHTALENE
DOSAGE	8-10 ML/KG DE CIMENT
NORMES RESPECTEES	ASTM C-494 (A) CSA A-266.2 (WN)

TABLEAU A.4: CARACTERISTIQUES DES GRANULATS

	CALCAIRE TROIS-RIVIERES (Qué.)	CALCAIRE OTTAWA (Ont.)	SCHISTE CHLORITEUX SHERBROOKE (Qué.)
CaO	47.88	47.55	12.41
SiO_2	8.93	9.23	47.80
Al_2O_3	1.09	0.82	15.43
Fe_2O_3	0.31	0.28	9.73
FeO Total	0.22	0.20	6.81
MgO	1.46	1.82	3.90
Na_2O	0.11	0.04	1.98
K_2O	0.20	0.15	0.87
SO_3	0.03	0.11	0.04
TiO_2	0.01	0.001	0.38
P_2O_5	0.14	0.34	0.02
MnO	0.051	0.50	0.30
P. au feu	39.14	39.07	7.42
TOTAL	99.34	99.47	100.2
ASTM C-289	- -	Rc=100 Sc=60.3	Rc=70 Sc=25
ASTM C-289* INSOLUBLES	Rc=200 Sc=837	Rc=170 Sc=700	Rc=10 Sc=51.5
% RESIDUS INSOLUBLES	12.55	12.81	70.12
DENSITE	2.47	2.47	2.85

TABLEAU A.5: CARACTERISTIQUES DES AJOUTS MINERAUX

	LAITIER AC	LAITIER AI	RESIDUS QUARTZ ST-CANUT	RESIDUS CARRIERE ST-MAURICE
CaO	27.79	37.91	0.80	49.29
SiO_2	23.51	26.57	96.86	8.62
Al_2O_3	6.72	4.06	0.84	0.85
Fe_2O_3	23.31	14.30	0.44	0.41
MgO	12.92	7.61	0.05	2.71
Na_2O	0.22	0.31	0.15	0.30
K_2O	0.04	0.04	0.19	0.16
SO_3	0.12	0.06	0.10	0.25
TiO_2	0.80	1.30	0.14	0.02
P_2O_5	0.30	0.14	0.00	0.35
MnO	2.98	2.84	0.018	0.18
P. au feu	0.51	0.98	0.73	36.37
Cr_2O_3	-	2.05	-	-
NiO	-	1.05	-	-
TOTAL	99.22	99.22	100.31	99.51
ALCALIS TOTAUX	0.25	0.34	0.27	0.40
% RETENU TAMIS 45 um*	-	32.3	54.1	20.7

* Maximum 34% d'après la norme ASTM C-618

TABLEAU A.6: LIMITES D'EXPANSION MAXIMALES SUGGEREES POUR LES DIVERS ESSAIS POUR LA REACTION ALCALIS-GRANULATS

CLASSES D'EXPOSITION (VOIR) (TABLEAU) (A.7)	ESSAI CSA A23.2-14A (PRISMES DE BETON)	ESSAI CSA A23.1-14A ACCELERE (PRISMES DE BETON) clause 2.5*	ESSAI ASTM C-227 (BARRES DE MORTIER)
A, B, C	0.01% à 3 mois** 0.025% à 1 an	0.04% à 1 an	0.05% à 3 mois*** 0.10% à 6 mois****
D	0.04% à tout âge (1 an)	0.075% à 1 an	0.05% à 3 mois 0.10% à 6 mois

* Pour la réaction alcalis-silice/silicate à expansion lente/tardive, les prismes doivent être entreposés dans des contenants scellés où règne une humidité relative de 100% et une température de 38 +/- 2 °C. Du papier ou autre matériel absorbant doit être placé sur les parois des contenants. Ce matériel doit être en contact avec l'eau au fond des contenants afin de faire office de mèche humide. Les prismes doivent être maintenus au-dessus de l'eau et ne doivent pas être en contact ni avec cette eau et ni avec les parois des contenants.

** Pour les structures critiques telles celles utilisées pour le nucléaire, une expansion maximale de 0.02% à 1 an est recommandée.

*** Comme pour la remarque précédente excepté que les limites sont de 0.05% à 6 mois et de 0.10% à 1 an.

**** Il est recommandé que lorsqu'utilisé pour évaluer des roches carbonatées contenant du chert, la teneur en alcalis du ciment utilisé pour fabriquer les barres de mortier soit augmentée à 1.25% par addition d'alcalis à l'eau de gâchage. Ceci est nécessaire parce que certains calcaires contenant du chert finement disséminé et trouvés acceptables sur la base de l'essai de barres de mortier ASTM C-227 provoquent la détérioration de béton in situ.

TABLEAU A.7: CLASSES D'EXPOSITION SPECIFIEES PAR LA NORME CSA A23.1-M77

CLASSES D'EXPOSITION	CONDITIONS D'EXPOSITION
A	Béton soumis à de fréquents cycles de gel et dégel lorsqu'il est saturé d'eau de mer, ou à l'application de produits de déglaçage. Exemples types: ouvrages exposés au niveau de la mer tels que les culées de ponts quais et écluses. Les surfaces exposées aux produits de déglaçage comprennent les tabliers de ponts, chaussées, bordures et caniveaux, planchers de garages et de stationnement.
B	Béton soumis à de fréquents cycles de gel et dégel lorsqu'il est saturé d'eau douce ou exposé à des mouillages peu fréquents par l'eau de mer. Exemples types: pieux, colonnes, piliers, culées de pont, quais et écluses partiellement immergés dans l'eau douce et murs de soutènement ou ouvrages situés près de la mer et exposés à des mouillages peu fréquents.
C	Béton soumis à de fréquents cycles gel et dégel dans des conditions non saturées. Exemples types: colonnes et poutres, murs de soutèmement d'édifice, piliers et culées de ponts exposés.
D	Béton non-exposé au gel et dégel, ni à l'application de produits de déglaçage. Exemples types: dalles de béton intérieures reposant sur le sol, planchers de béton, murs et poteaux intérieurs.

TABLEAU A.8: RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE

ECHANTILLON (CYL.150 X 300 MM)	RESISTANCE (MPa)	AGE (MOIS)	% DU CONTROLE
TR-CTL	32.6	7	CTL
TR-FSC-5%	45.6	6	140
TR-FSC-10%	48.0	6	147
TR-LSG-5%	38.8	6	119
TR-LSG-10%	45.6	6	140
OTT-CTL	28.3	1	CTL
OTT-FSC-5%	39.3	1	139
OTT-FSC-10%	41.0	1	145
OTT-FSC-15%	43.5	1	154
OTT-LSG-5%	29.9	1	106
OTT-LSG-10%	32.6	1	115
OTT-LSG-15%	35.2	1	124
SHE-CTL	34.0	1	CTL
SHE-FSC-5%	38.6	1	114
SHE-FSC-10%	45.0	1	132
SHE-FSC-15%	50.2	1	148
SHE-LSG-5%	35.6	1	105
SHE-LSG-10%	33.7	1	99
SHE-LSG-15%	32.2	1	95

TR = TROIS-RIVIERES
OTT = OTTAWA
SHE = SHERBROOKE

CTL = CONTROLE
FSC = FUMEE DE SILICE CONDENSEE
LSG = LAITIER SILICATE GRANULE

TABLEAU A.9: RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE

(autres résultats)

ECHANTILLON (CYL.150 X 300 MM)	RESISTANCE (MPa)	AGE (MOIS)	% DU CONTROLE
TR-CTL	32.6	7	CTL
TR-NAL	35.6	6	109
TR-Na2O-2.07%	39.7	6	122
TR-AC-10%	36.1	6	111
TR-PQ-10%	32.2	6	99
TR-PC-10%	28.2	6	87
SHE-FSC-5%	45.8	9	-
SHE-FSC-10%	49.5	9	-
SHE-CTL-054	49.8	5	CTL
SHE-CTL-134	34.0	1	CTL
SHE-CTL-006	41.5	6	CTL
SHE-CTL-012	46.1	10	CTL
SHE-CTL-013	39.9	6	CTL
SHE-CTL-037	43.5	5	CTL
SHE-CTL-038	47.5	10	CTL
SHE-AI-5%	40.8	7	120
SHE-AI-10%	39.7	7	111

TR = TROIS-RIVIERES
OTT = OTTAWA
SHE = SHEBROOKE

CTL = CONTROLE
FSC = FUMEE DE SILICE CONDENSEE
LSG = LAITIER SILICATE GRANULE

Fig. A.1-Photographie du granulat de Trois-Rivières en lame mince. Notez la présence de petits nodules de calcédoine à l'intérieur du fossile. (Lumière polarisée, 100 X).

Fig. A.2-Photographie du granulat d'Ottawa en lame mince. Notez la présence de chert-calcédoine au centre de la photographie. (Lumière polarisée, 100 X)

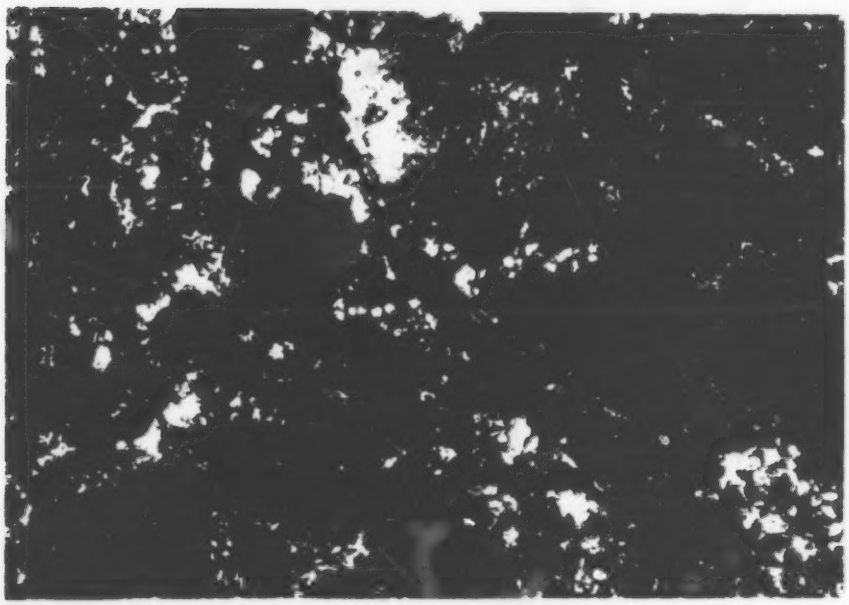


Fig. A.3-Photographie du granulat d'Ottawa en lame mince. Notez la présence d'un fossile complètenent silicifié au centre de la photographie. (Lumière polarisée, 100 X)

Fig. A.4-Photographie du granulat de Sherbrooke en lame mince. Il s'agit d'une zone riche en calcite (plages à biréfringence élevée) avec des petites zones avec des petits grains de quartz à contact mal défini. (Lumière polarisée, 100 X)

Fig. A.5-Photographie du granulat de Sherbrooke en lame mince. Il s'agit d'une zone riche en calcite (plages à biréfringence élevée) avec des petits grains de quartz à contact mal défini. (Lumière polarisée, 100 X)

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
FICHE DES CARACTERISTIQUES DES MELANGES, ESSAIS D'EXPANSION

MELANGE: OTTAWA-LSG-5%-365-369 PROJET: CDT7042-DOC

DATE DU MELANGE: 15/06/1987

		NO. DE REFERENCE
CIMENT:	TYPE 10	RE-001-CIM
GROS GRANULAT:	OTTAWA	RE-014-GRA
SABLE:	ST-FELIX-DE-VALOIS	RE-002-GRA
ADDITIF MIN.:	LAITIER SILICATE GRANULE	RE-006-ADM
ADDITIF CHI.:	SUPERPLASTIFIANT SULF. NAPH	RE-009-ADC
EAU:	DISTILLEE	-

DOSAGE DU MELANGE:

CONSTITUANT:		QUANTITE: (KG)
CIMENT		6.8
ADDITIF MINERAL	5%	1.2
ADDITIF CHIMIQUE	60 ml	60 ml
EAU		4.0
SABLE		20
	CALIBRE	
GROS GRANULAT	14mm 1/3	10
	10mm 1/3	10
	05mm 1/3	10
	POIDS TOTAL:	62
	VOLUME DU MELANGE:	0.025M^3

DETAILS:

RAPPORT EAU/CIMENT: 0.5 +ADD.M.

RAPPORT SABLE/G.GRA: 0.66

RAPPORT CIMENT/GRAN: 0.16 +ADD.M.

ETALEMENT: 110 MM

TENEUR EN AIR: 2.4 %

TEMPERATURE: 20 °C

COMMENTAIRES:

PRISMES = 365-366-367

CYLINDRES = 368-369

TRAVAUX EFFECTUES PAR: RAYMOND GUERARD, BENOIT DURAND

Fig. A.6-Exemple de mélange type.

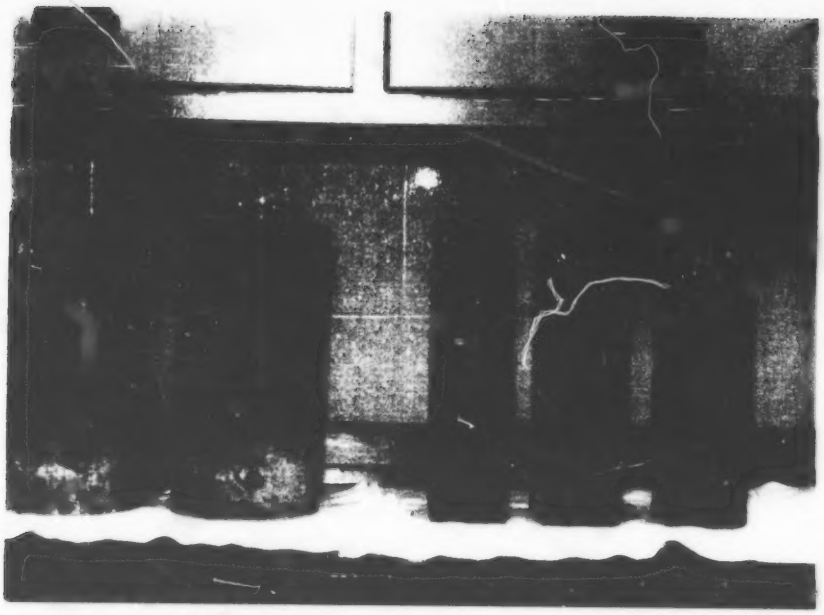


Fig. A.7-Photographie d'une série de prismes et de cylindres de béton fabriqués à partir d'un mélange type.

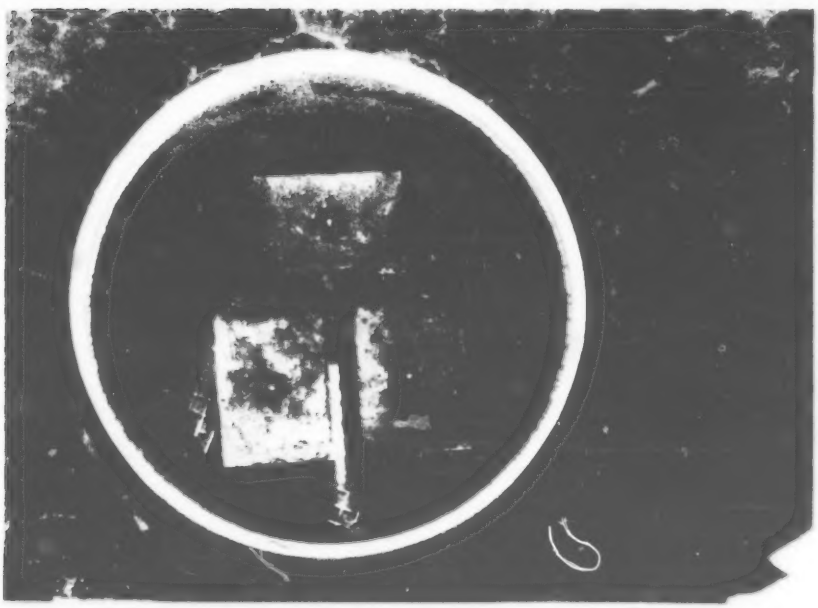


Fig. A.8-Photographie d'un contenant en plastique servant à l'entreposage à 38 °C des prismes des essais d'expansion.

ANNEXE B

DESCRIPTION DES ESSAIS D'EXTRACTION DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE

B.1- CARACTERISTIQUES DES MELANGES

B.1.1- MATERIAUX UTILISES

CIMENT: PORTLAND TYPE 10 (Voir le tableau A.1)

EAU: DISTILLEE

SABLE: ST-FELIX DE VALOIS, LANAUDIERE, Qc
McWATTERS, TEMISCAMINGUE, Qc

(Voir le tableau A.2)

ADDITIF CHIMIQUE: SUPERPLASTIFIANT
SULFONATE DE NAPHTALENE

(Voir le tableau A.3)

GRANULATS: -CALCAIRE DE TROIS-RIVIERES, Qc
-CALCAIRE D'OTTAWA, Ont.
-SCHISTE CHLORITEUX DE SHERBROOKE, Qc

(Voir le tableau A.4)

AJOUTS MINERAUX: (Voir le tableau A.1)

B.1.2- PROPORTIONS DES MELANGES

CIMENT* + AJOUT MINERAL = 310 kg/m³

RAPPORT EAU/CIMENT + AJ. MIN. = 0.5

RAPPORT SABLE/GRANULAT = 0.66

$$\text{RAPPORT } \frac{\text{CIM. + AJ. MIN.}}{\text{SABLE + GRAN.}} = 0.16$$

*La teneur en Na_2O équ. du ciment est augmentée à une teneur de 1.25% par addition de NaOH à l'eau de gâchage.

B.2- CARACTERISTIQUES DE LA CURE

24 PREMIERES HEURES A 23 °C ET A 38 °C PAR LA SUITE

(DANS DES CONTENANTS SCELLES)

B.3- MODE OPERATOIRE DE PREPARATION DES MELANGES

Les granulats, le ciment et les ajouts sont prémélangés à sec dans un bol. L'agent superplastifiant et le NaOH sont ajoutés à l'eau quelque temps avant le malaxage.

Le malaxage est fait manuellement et dure environ 3 minutes. Par après, le mélange est placé dans 2 petits contenants en plastique d'une capacité de 200 ml (7 cm de haut X 7 cm de diamètre). Ces contenants sont par la suite placés dans une chaudière d'une capacité d'environ 50. Il s'agit des mêmes chaudières que celles utilisées

pour l'entreposage des prismes des essais d'expansion (voir l'annexe A). Tous les contenants sont scellés convenablement.

Pour les 24 premières, les échantillons sont placés dans une chambre à 23 °C et après 24 heures, ils sont placés à 38 °C.

Au moment de l'essai d'extraction, les échantillons sont retirés des contenants (2 par essai) puis immédiatement placés à l'intérieur du cylindre.

Le mode de préparation des échantillons de pâte est le même que pour les échantillons de béton.

B.4- REMARQUE

Les niveaux de remplacement des ajouts sont les pourcentages en poids des ajouts par rapport à la quantité de ciment du mélange de contrôle.

Ex.: Si le mélange de contrôle = 10 kg de ciment,
le mélange 10% FSC = 9 kg de ciment + 1 kg de FSC

B.5 DESCRIPTION DE L'APPAREIL D'EXTRACTION

L'appareil d'extraction comprend deux parties distinctes: (voir les figures B.1 et B.2)

1-La partie où les échantillons sont pressés. Elle consiste en une base avec un drain, un cylindre creux et un piston.

2-La partie servant à recueillir la solution interstitielle. Elle consiste en deux erlenmeyers dont l'un est directement à une pompe à vide et l'autre est relié au drain de la base. Les deux erlenmeyers sont reliés ensemble. Nous avons utilisé ce montage à deux erlenmeyers afin d'éviter de contaminer la pompe à vide.

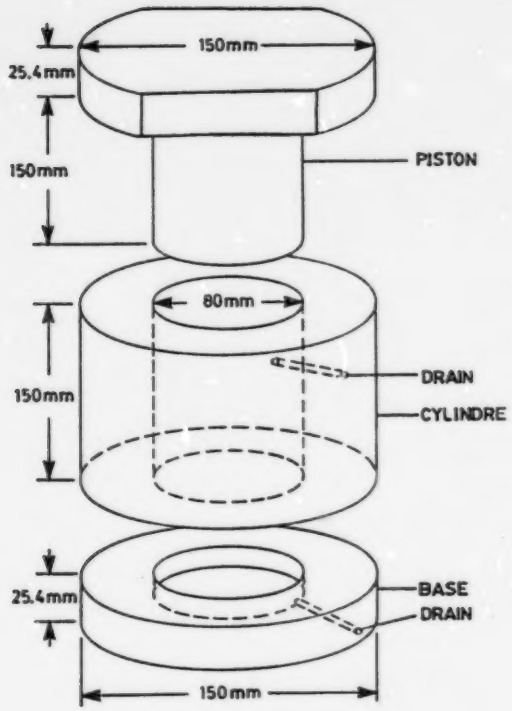
Un essai d'extraction consiste à placer un échantillon dans le cylindre, à mettre en place le piston et d'y appliquer progressivement, à l'aide d'une presse hydraulique, une charge qui atteind 1 335 kN. La pression résultante au niveau de l'échantillon est de l'ordre de 300 MPa (43 500 lb/po.^{2}). Les volumes de solution extraite sont fonction du type de mélange et de l'âge de l'échantillon. Pour des pâtes contenant 11% de fumée de silice et âgées de 21 jours, il est possible de recueillir environ 10 ml de solution. La solution extraite est recueillie dans une éprouvette de prolypopylène qui est gardée scellée jusqu'au moment de l'analyse.

La mise en charge dure généralement entre 5 et 10 minutes. Un essai complet comprend la préparation de l'appareil, la mise en place de l'échantillon, la mise en charge, le retrait du piston et de l'échantillon pressé ainsi que le nettoyage et le remontage. Un essai complet requiert environ 1.5 heure de travail pour deux personnes. Il est à noter qu'un lubrifiant non-contaminant est vaporisé dans le cylindre avant chaque essai d'extraction. Il s'agit d'un fluorocarbone.

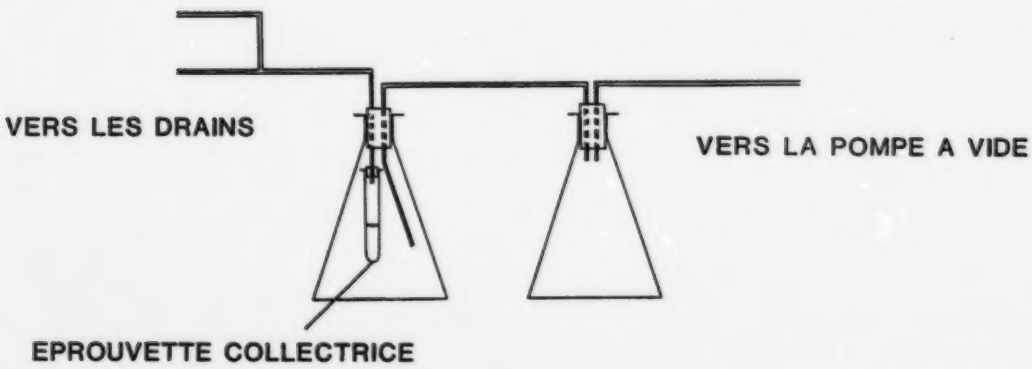
B.6- DESCRIPTION DES METHODES D'ANALYSES DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE

La solution interstitielle est analysée pour ses concentrations en ions Na^+, K^+, Ca^{2+} et OH^-. Les concentrations en ions Na, K et Ca sont mesurées par spectroscopie d'absorption à la flamme tandis que la concentration en ions OH^- est obtenue par titrage à l'H_2SO_4 car la concentration en ions OH^- est jugée trop élevée pour être mesurée à l'aide d'un pH-mètre.

Fig. B.2-Photographie de l'appareil d'extraction de solution interstitielle.



PARTIE 1: EXTRACTION



PARTIE 2: RECUPERATION

Fig. B.1-Schéma de l'appareil d'extraction de la solution interstitielle.

ANNEXE C

DESCRIPTION DES ESSAIS DE PERMEABILITE A L'AZOTE

C.1- DESCRIPTION DES ECHANTILLONS

Les échantillons utilisés pour les essais de perméabilité à l'azote sont des tranches des cylindres de béton décrits à l'annexe A. Il s'agit de cylindres de béton de 300 mm de haut par 150 mm de diamètre dont une tranche de 80 mm est prélevée au centre. Après une courte période de séchage à l'air libre, la périphérie des tranches est recouverte d'une couche d'époxyde qui rend la surface ainsi recouverte lisse et étanche.

Avant l'essai de perméabilité, chaque tranche de cylindre est séchée à l'étuve à 80 °C pendant 24 heures. Les échantillons sont par la suite placés dans un dessiccateur jusqu'au moment de leur mise en place dans le perméamètre.

C.2- DESCRIPTION DU PERMEAMETRE (voir les figures C.1 et C.2)

Le perméamètre que nous avons utilisé consiste en une base circulaire à laquelle s'adapte une cloche avec hublots maintenue en place par 12 boulons. L'étanchéité entre ces deux parties est assurée par un joint torique en caoutchouc.

La cellule du perméamètre est reliée à une bouteille d'azote sec par un système de tuyaux et de manomètres qui permet de contrôler les pressions dans la cellule, à l'extérieur et à l'intérieur de l'échantillon. Un second système de tuyaux relie la cellule à un débitmètre. Finalement, un troisième système de tuyaux relie la cellule à une source d'eau. Une valve d'évacuation est également présente.

Lors d'un essai, un échantillon est placé sur un socle de 150 mm de diamètre faisant partie de la base de la cellule. Une tête amovible de 150 mm de diamètre est placée sur l'échantillon. Le socle est relié au débitmètre et la tête est reliée à la bonbonne d'azote via un manodétendeur. Une membrane de caoutchouc est placée de façon à couvrir entièrement l'échantillon et une partie du socle et de la tête. Quatre joints toriques de caoutchouc sont placés 2 à 2 autour du socle et de la tête, au niveau de l'interface appareil-échantillon.

Après avoir rempli d'eau la cellule, nous augmentons progressivement la pression à l'extérieur et à l'intérieur de l'échantillon en gardant toujours la pression externe supérieure à la pression interne. Le débit est noté pour des pressions internes allant de 5 kg/cm^2 à 7 kg/cm^2. La pression externe est maintenue à environ 1 kg/cm^2 de plus que la pression interne.

Le débitmètre consiste en une burette graduée de 100 ml dont l'ouverture est placée dans un petit réservoir rempli d'eau. Pour obtenir le débit, il s'agit de chronométrer le temps que met le niveau d'eau à baisser d'une certaine valeur (volume/temps donne le débit). Une légère correction doit être apportée au volume étant donné la compressibilité de l'azote. Pour un échantillon de 80 mm d'épaisseur, le débit devient constant une dizaine de minutes après le début de l'essai. La prise de mesure dure environ 30 minutes. La mise en place, la prise de mesure et le retrait d'un échantillon requiert environ 1 heure de travail pour une personne.

Les résultats obtenus sont par la suite placés sur un graphique pression appliquée versus coefficient de perméabilité. On remarque que le coefficient de perméabilité du béton aux gaz augmente légèrement en fonction de la pression appliquée (cf. chap. IV, section IV.5).

Le coefficient de perméabilité est calculé à partir de l'équation suivante:

$$K_c = \frac{dV \cdot H \cdot d_{N2}}{dT \cdot P \cdot A} \qquad (C.1)$$

où K_c = Coefficient de perméabilité (cm/s)

dV/dT = Débit (cm^3/s)

H = Hauteur de l'échantillon (cm)

A = Surface de l'échantillon (cm^2)

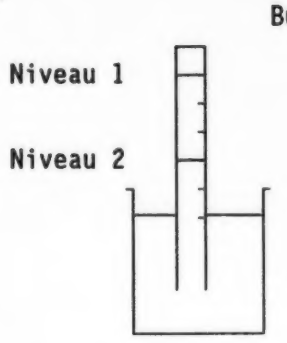
d_{N2} = Densité de l'azote à T=21 °C (g/cm^3)

P = La pression interne appliquée (g/cm^2)

C.3- PRINCIPE DU DEBITMETRE

Le volume de gaz mesuré par le débitmètre varie en fonction de la pression à l'intérieur de la burette. Cette pression est le résultat de 2 pressions agissant simultanément, i.e., la pression atmosphérique et la pression due à la colonne d'eau dans la burette. En fait, ce que l'on recherche, c'est le volume de l'azote à la pression atmosphérique car la densité que nous utilisons est donnée en fonction de la pression atmosphérique. Or, au cours de l'écoulement de l'eau dans la burette, la baisse de la colonne d'eau diminue quelque peu la pression exercée sur l'azote, donc influence le volume d'azote mesuré. Nous avons tenté d'estimer l'influence de cette diminution de pression sur la précision des mesures.

Soit:



h = Niveau 1 - Niveau 2

et soit $P_{atm} \approx 1$ atm. ≈ 1033.3 g/cm^2

et T = cte, donc densité H_2O (δ_{H2O}) = cte

= 1.0 gramme/cm^3

$P_{N2}\ V_{N2} = nRT$

P_{N2} dans la burette = $P_{atm} - P_{H2O}$

$= P_{atm} - h_{H2O} \cdot \delta_{H2O}$

$$V_{N2} \text{ à } P_{atm} = V_{N2} \text{ dans la burette} \cdot \frac{P_{atm} - h_{H2O} \cdot \delta_{H2O}}{P_{atm}}$$

Pour h (baisse de la colonne d'eau) = 10 cm

$$V_{N2} \text{ à } P_{atm} = V_{N2} \cdot \frac{P_{atm} - 10 \text{ cm} \cdot 1.0 \text{ g/cm}^3}{P_{atm}}$$

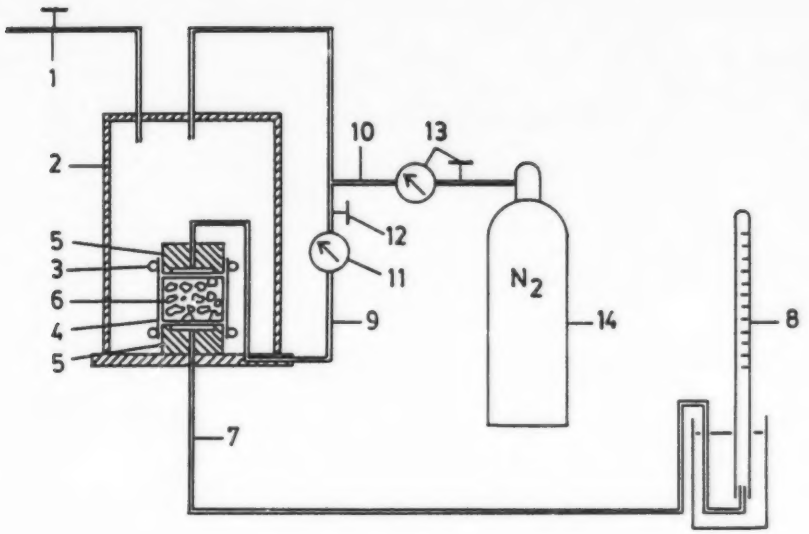
$$V_{N2} \text{ à } P_{atm} = V_{N2} \cdot \frac{1033.3 \text{ g/cm}^2 - 10 \text{ cm} \cdot 1.0 \text{ g/cm}^3}{P_{atm}}$$

$= V_{N2} \cdot 0.99$ (h = 10 cm)

Si h = 20 cm, $V_{N2} = 0.98$

Si h = 30 cm, $V_{N2} = 0.97$

Conclusion: le facteur de correction demeure tout
de même minime.



1- SORTIE ET VALVE D'EVACUATION DE LA CELLULE

2- CELLULE

3- JOINTS TORIQUES

4- MEMBRANE DE CAOUTCHOUC

5- TETE ET BASE

6- ECHANTILLON

7- SORTIE DE L'ECHANTILLON

8- BURETTE (DEBIMETRE)

9- ENTREE DE L'ECHANTILLON

10- ENTREE DE LA CELLULE

11-12- MANOMETRE ET DETENDEUR D'ENTREE DE L'ECHANTILLON

13- MANOMETRE ET VALVE D'ENTREE DE LA CELLULE

14- BONBONNE D'AZOTE

Fig. C.1-Schéma du perméamètre à azote.

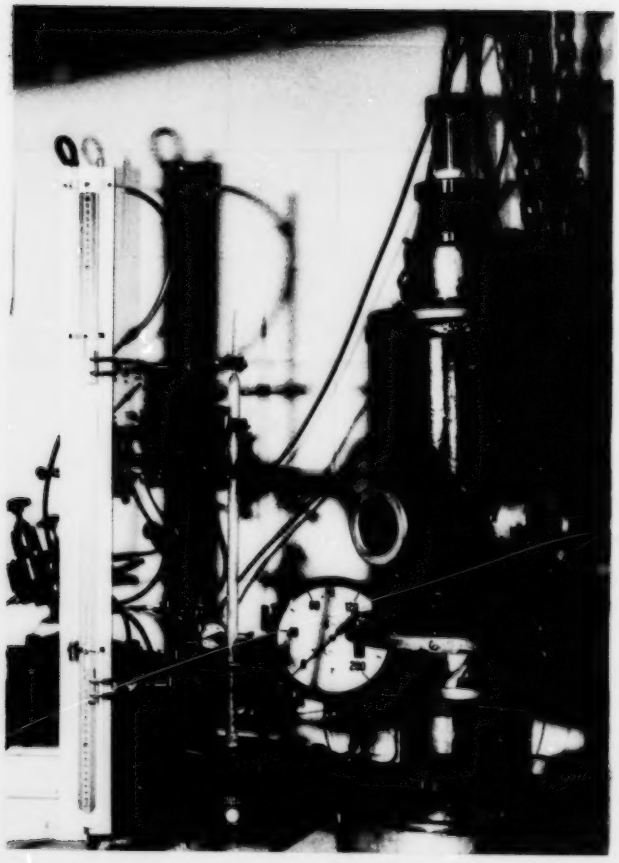


Fig. C.2-Photographie du perméamètre à azote

Annexe D

DETAILS CONCERNANT LES THERMOANALYSES

Type d'appareil: Netzsch Geratebaer Thermobalance 409

Type de creuset: Alumine

Tige de support: Alumine

Matériel de référence: 300 mg d'alumine calciné

Poids de l'échantillon: 300 mg

Atmosphère: Air synthétique à circulation forcée

Gammes de thermogravimétrie: 25 mg

Gammes de thermométrie différentielle: 0.5 microvolts

Programme de chauffe: de 25°C à 650°C: 20°/minute

Température maximale: 650°C

ANNEXE E

DETAILS CONCERNANT LES DIFFRACTIONS DES RAYONS X

Type d'appareil: Diffractomètre Philips-Norelco

Type de détecteur: Compteur proportionnel scellé au gaz

Radiation: Cuivre K_{α}

Energie: 40 KV

Courant: 20 mA

Comptage: 100 à 200 comptes/seconde

Constante de temps: 4

Vitesse angulaire: 1 degrés/minute

Atténuation: 1.2

Fenêtre: 0

Lecture: Papier millimétrique

Vitesse de déroulement du papier: 10 mm/min.

Note: A moins qu'il en soit spécifier autrement, ces conditions ont prévalu pour toutes les diffractions-X effectuées lors de cette étude.

ANNEXE F

DETAILS CONCERNANT LES OBSERVATIONS EFFECTUEES PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

Nous avons effectué l'examen d'échantillons de béton fabriqués avec les granulats de Trois-Rivières, d'Ottawa et de Sherbrooke à l'aide d'un microscope électronique à balayage JEOL JSM-820 équipé d'un spectromètre à dispersion d'énergie au silicium dopé au lithium TRACOR X-RAY dont la limite de détection est le Na. Le détecteur est relié à un ordinateur TRACOR NORTHERN TN 2000.

Les échantillons utilisés proviennent des mêmes échantillons que ceux qui ont servi à effectuer les examens pétrographiques, i.e., qu'il s'agit de fragments de cylindres qui ont été fabriqués à partir des mêmes mélanges (mêmes gâchées) que les prismes des essais d'expansion (voir l'annexe A et l'annexe G). Les échantillons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières étaient âgés de 1 an et les échantillons fabriqués avec les granulats d'Ottawa et de Sherbrooke étaient âgés de 6 mois.

Pour chacun des échantillons, nous avons examiné une surface de cassure, une surface sciée et une surface naturelle. La dimension des fragments prélevée est de l'ordre du cm^3. Après avoir prélevé les fragments, nous les avons placés à l'étuve pendant une vingtaine de

minutes à une température de 60 °C. Par la suite, nous les avons recouverts d'une mince couche de carbone à l'aide d'un évaporateur à électrode de carbone. Chaque série de fragments appartenant au même échantillon a préalablement été collé sur une petite plaque de verre afin de faciliter la manipulation des échantillons.

Au moment de l'observation au microscope électronique à balayage, notre attention a principalement porté sur la présence de produits de réaction et sur la localisation de ceux-ci. Par exemple, dans le cas des granulats calcaires, nous avons tenté de détecter la présence de gel calco-silico-alcalin au sein des microfissures détectées lors des examens pétrographiques. Nous avons photographié les produits de réaction détectés et, lorsque les conditions étaient favorables, nous avons effectué une analyse par fluorescence-X de ces produits. Les résultats des analyses par fluorescence-X ont ensuite été imprimés à l'aide d'une table traçante électronique sous forme de graphiques où l'on peut observer l'intensité relative des pics de fluorescence-X correspondant aux différents éléments constituants en fonction de leur énergie (en kiloélectrons-volts). Aucune correction (fluorescence, absorption ou de numéro atomique) n'est effectuée par l'ordinateur avant de transmettre les données à la table traçante électronique.

Les résultats de ces observations sont présentés au chapitre X.

ANNEXE G

DETAILS CONCERNANT LES EXAMENS PETROGRAPHIQUES

Nous avons effectué l'examen pétrographique détaillé d'échantillons de béton fabriqués à partir des mêmes mélanges que les prismes de béton des essais d'expansion. Les détails concernant les matériaux utilisés, le type de mélanges, le mode de préparation ainsi que le type de cure appliquée sont données à l'annexe A.

Parallèlement aux prismes de béton, nous avons fabriqué des cylindres de bétons de 150 mm X 300 mm que nous avons entreposés dans les mêmes conditions que les prismes des essais d'expansion, i.e., à 38 °C et plus de 95% d'humidité relative. Après une période prédéterminée, nous avons scié ces cylindres en tranches que nous avons par la suite polies à l'aide d'abrasifs. Pour tous les échantillons, nous avons effectué un polissage à l'aide d'un abrasif de calibre 120, 240 et 400 mailles. Ce polissage, notamment dans le cas des granulats calcaires, a permis de mettre en évidence les microfissures dans ces mêmes granulats.

Par la suite, nous avons examiné attentivement les tranches ainsi préparées à l'aide d'une loupe binoculaire jusqu'à un grossissement maximal de 40X. Au moment de l'examen, nous avons pris

soin de mouiller légèrement la surface des échantillons ce qui permet de distinguer d'avantage les microfissures car celles-ci sèchent plus lentement que le reste de la surface.

Au cours de cet examen, nous avons effectué un comptage systématique des granulats qui présentaient des microfissures. Le nombre de microfissures visibles a également été déterminé à partir d'échantillons témoins, i.e., des échantillons possédant les mêmes caractéristiques que les échantillons de contrôle mais qui ont été préparés pour l'examen pétrographique après seulement un mois de cure à 38 °C et à plus de 95% d'humidité relative. Au moment de l'examen pétrographique, les échantillons fabriqués avec le granulat de Trois-Rivières étaient âgés d'un an et les échantillons fabriqués avec le granulat d'Ottawa et de Sherbrooke étaient âgés de 6 mois.

Lors de l'examen pétrographique des échantillons, en plus du comptage des granulats microfissurés, nous avons déterminé la présence ou non de produits de réaction au niveau des pores de la pâte ainsi qu'au niveau de la surface externe des échantillons (périphérie des cylindres). Nous avons également déterminé l'abondance relative de ces produits de réaction ainsi que leur aspect morphologique et leurs teintes.

Finalement, nous avons estimé l'abondance relative des microfissures visibles au niveau de la surface externe des

échantillons.

Les résultats des examens pétrographiques font l'objet du chapitre XI.

ANNEXE H

NOTE SUR L'ESSAI D'EXPANSION NON-NORMALISE D'UN MINI-PRISME DE CALCAIRE

Dans le but de vérifier que du gel se forme bel et bien dans les microfissures des granulats calcaires du type Trois-Rivières et que ce gel produit une expansion, nous avons effectué l'expérience suivante. Nous avons d'abord fabriqué un mini-prisme de roche à l'aide d'un bloc de calcaire de Trois-Rivières. Il s'agit d'un prisme d'environ 5 cm de longueur et de 1.5 cm d'arète constitué de 8 tranches. Chacune des surfaces de ces tranches a été polie à l'aide d'abrasifs de calibre 120, 240 et 400 mailles. Les tranches des extrémités du prisme ont été forées afin d'y implanter des plots qui ont servi à mesurer périodiquement le prisme. Nous avons confectionné un cadre de plexiglas afin de maintenir les tranches en place tout en permettant à l'ensemble de prendre une expansion longitudinale. Ce cadre de plexiglas comprend en autre deux ressorts qui s'appuient à la fois sur les extrémités du prisme et du cadre. Ces ressorts permettent d'appliquer une contrainte longitudinale sur le prisme. La figure H.1 présente le schéma de ce montage.

Une fois le mini-prisme mis en place, nous avons placé l'ensemble du montage dans un litre d'une solution de soude 1N et nous avons entreposé le tout à 38 °C (bouteille de polyéthylène

scellée). La mesure initiale a été effectuée après que le prisme eut séjourné 24 heure dans de l'eau distillée à 38°C. Les mesures subséquentes ont été effectués périodiquement jusqu'à l'âge de 2 mois.

La figure H.2 présente les résultats obtenus en terme d'expansion en fonction du temps. Le moins que l'on puisse dire, c'est que l'expansion est très importante. Après avoir cessé de prendre les mesures d'expansion, nous avons examiné le mini-prisme à la loupe binoculaire ainsi qu'au microscope électronique à balayage. Nos observations confirment la présence de produits de réaction au niveau de la surface externe du mini-prisme ainsi qu'au niveau des surfaces internes des tranches individuelles du mini-prisme. Des analyses par fluorescence-X effectuées lors d'une séance de microscopie électronique à balayage ont révélé que le principal produit de réaction est un gel calco-silico-sodique. L'absence de K est considérée normale étant donné que la solution utilisée pour entreposer le montage était une solution de NaOH.

A la surface des tranches, nous avons noté que le gel forme une couche plus épaisse et plus visible en bordure car de teinte blanchâtre et d'aspect crayeux. Au centre, il s'agit d'une couche très mince et translucide de ce gel.

Cette expérience succincte nous a permis de constater que la

formation de gel au niveau des interfaces à l'intérieur du calcaire se produit simultanément à une expansion de ce même calcaire. Cette expérience confirme, du moins à piori, une partie du mécanisme par lequel les granulats calcaires réactifs aux alcalis du type de Trois-Rivières produisent de l'expansion, i.e., par production de gel calco-silico-alcalin au niveau des microfissures dans ces mêmes granulats.

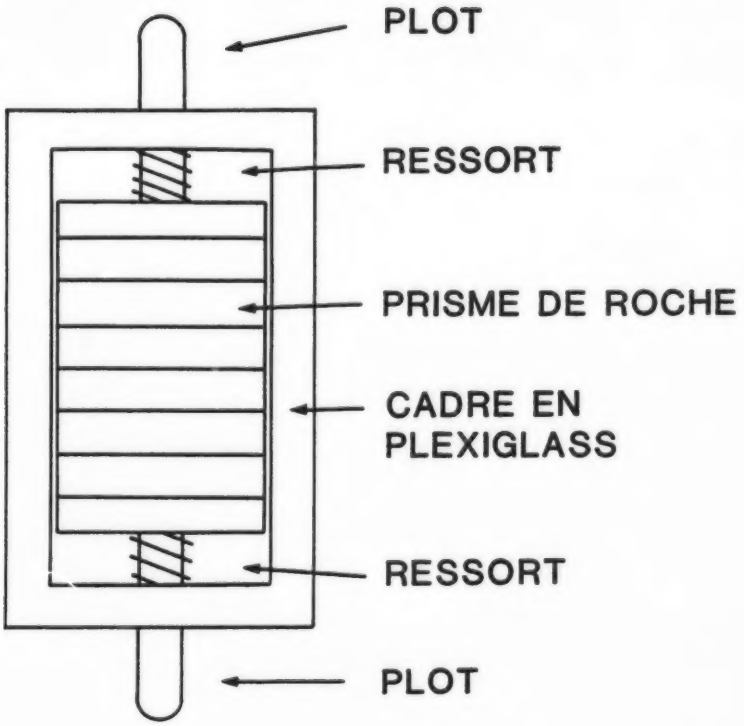


Fig. H.1-Schéma du montage de l'essai
d'expansion du mini-prisme.

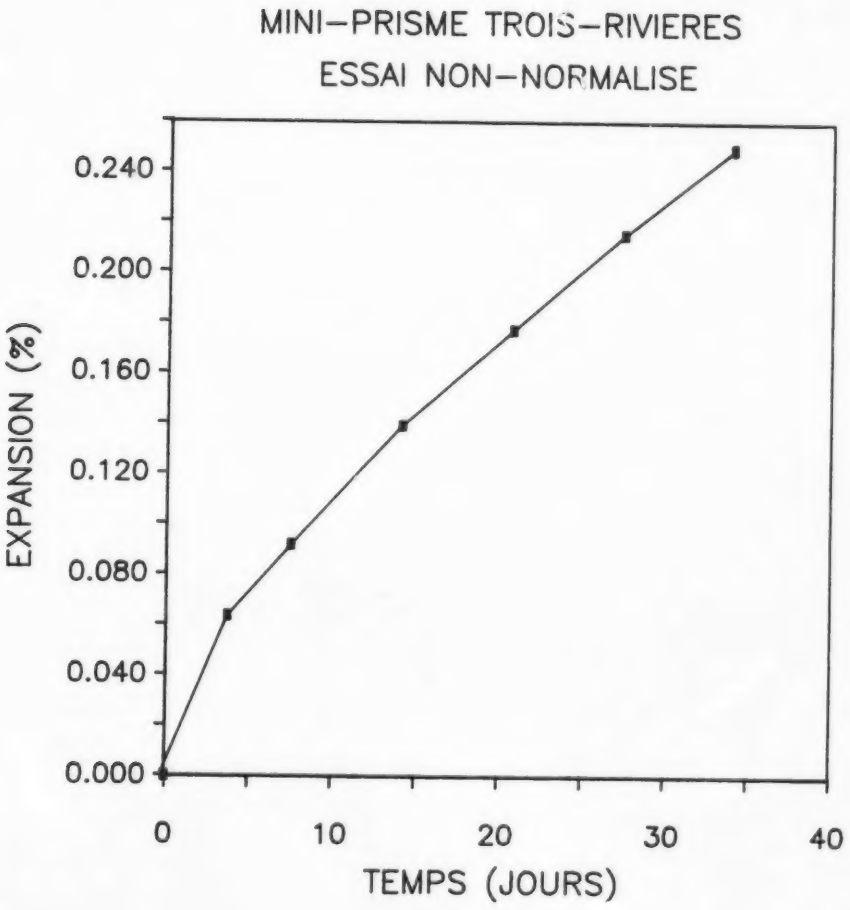


Fig. H.2-Evolution de l'expansion du mini-prisme. (Cure à 38 °C dans une solution de NaOH 1N)

ANNEXE I

RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LES SABLES

Tel que spécifié par la norme CSA A23.2-14A, nous avons vérifié que les sables utilisés pour nos mélanges de béton ne sont pas réactifs aux alcalis. Cette norme spécifie que le sable utilisé doit être classé non-réactif selon la norme ASTM C-227 (essai d'expansion de barres de mortier entreposées à 38 °C et à une humidité relative de 100%).

Nous avons fabriqué 4 barres de mortier pour chacun des deux sables utilisés, soit 2 barres avec un rapport E:C de 0.38 et 2 barres avec un rapport E:C de 0.5. Ce premier rapport E:C est un rapport conforme aux spécifications de la norme (basé sur un étalement) et le second rapport E:C est le même que nous avons utilisé pour fabriquer les prismes de bétons de nos essais d'expansion.

Les résultats des essais sont présentés aux figures I.1 et I.2. Dans tous les cas, les expansions obtenues demeurent inférieures aux limites d'expansion spécifiées par la norme ASTM C-227, soit 0.05% d'expansion maximale à 6 mois et 0.1% d'expansion maximale à 1 an. Dans le cas du sable provenant de la région de Lanaudière, c'est avec le rapport E:C le plus faible que la plus grande expansion a été

obtenue. Dans le cas du sable provenant de la région du Témiscamingue, c'est avec le rapport E:C le plus élevé que la plus grande expansion a été obtenue. Dans tous les cas, après 450 jours, les expansions demeurent inférieures à 0.015%.

A partir de ces résultats, nous concluons que les deux sables que nous avons utilisés pour les essais d'expansion de prismes de béton n'ont contribué, s'il y a lieu, que très légèrement aux expansions.

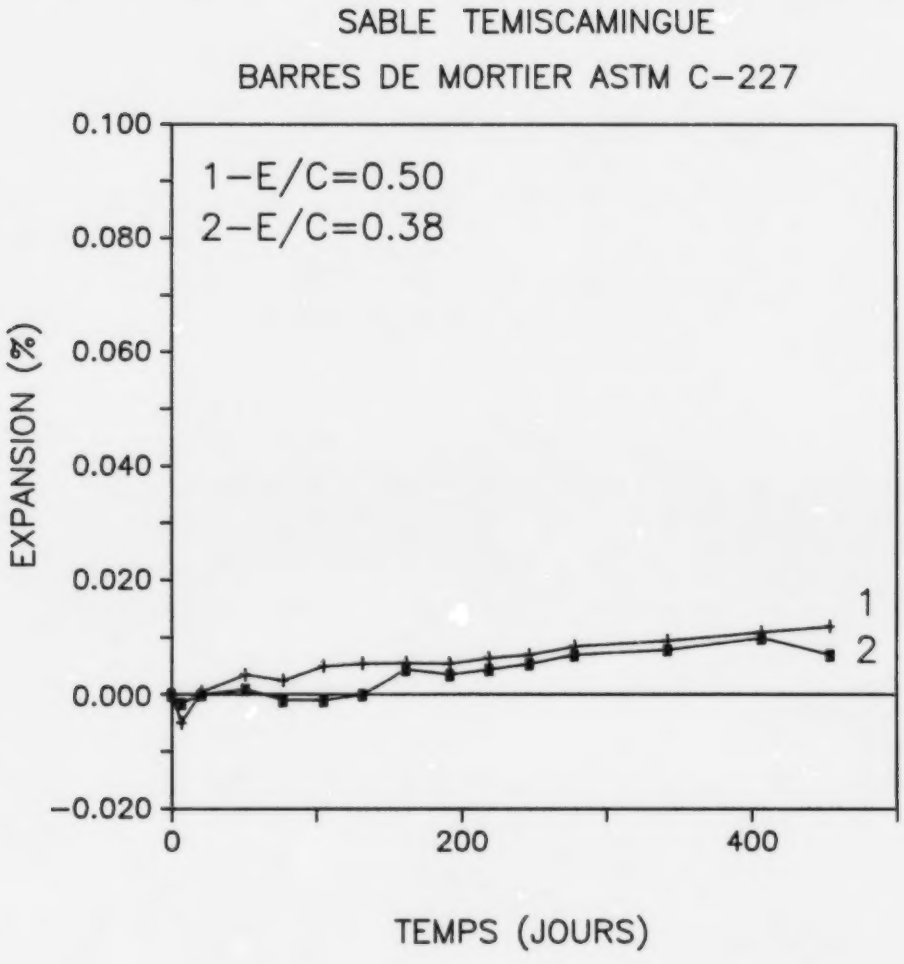


Fig. I.1-Evolution de l'expansion pour le sable du Témiscamingue. (Barres de mortier, norme ASTM C-227)

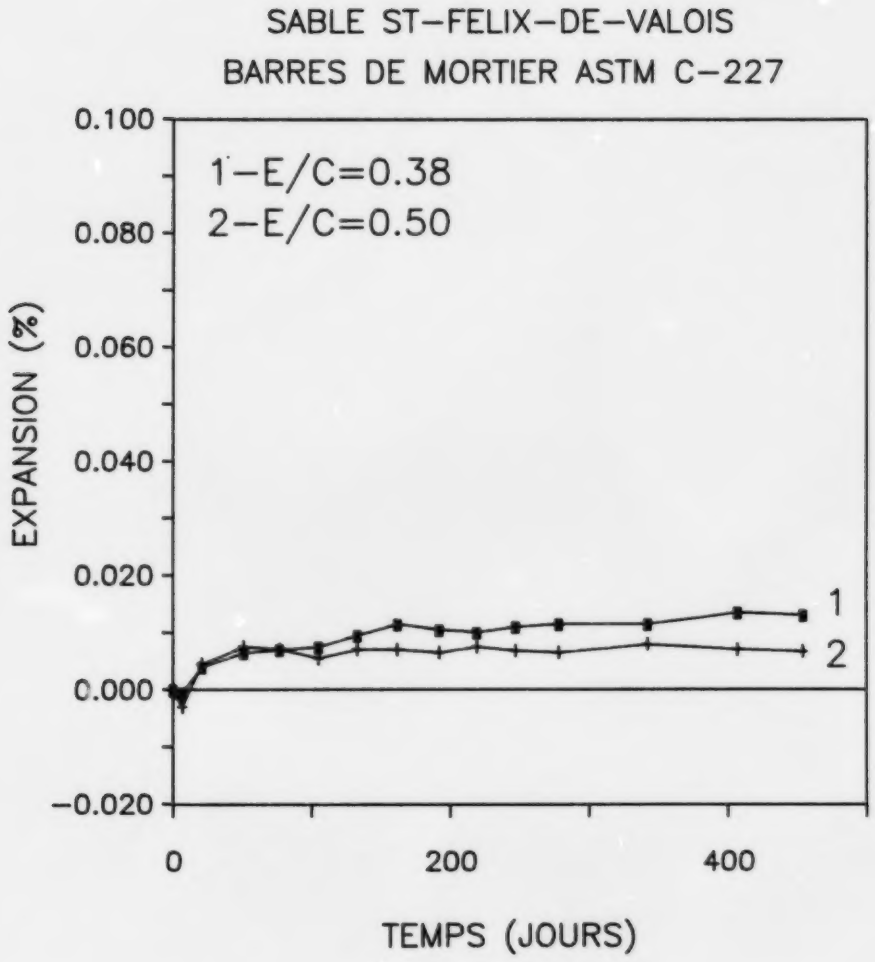


Fig. I.2-Evolution de l'expansion pour le sable de St-Félix de Valois. (Barres de mortier, norme ASTM C-227)

ANNEXE J

TABLEAUX PRESENTANT L'ENSEMBLE DES DONNEES

(CERTAINES DONNEES SONT PRESENTEES)

(A L'INTERIEUR DES DIFFERENTS CHAPITRES)

TABLEAU J.1: RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES COMBINE AVEC LA FUMEE DE SILICE CONDENSEE ET LE LAITIER SILICATE GRANULE (PRISMES DE BETON, NORME CSA A23.2-14A)

AGE (JOURS)	T.-R. CTL EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. 5% FSC EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. 10% FSC EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. 5% LSG EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. 10% LSG EXP. (%)
0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
8	0.0023	7	-0.0068	7	-0.0090	7	-0.0053	6	0.0007
15	0.0015	17	-0.0075	13	-0.0077	16	-0.0013	14	0.0010
26	0.0028	30	-0.0070	24	-0.0077	29	-0.0013	32	0.0020
55	0.0165	57	-0.0053	54	-0.0055	57	0.0040	55	0.0050
84	0.0500	85	-0.0065	82	-0.0060	85	0.0083	83	0.0093
111	0.0840	113	-0.0045	111	-0.0070	113	0.0147	111	0.0157
161	0.1213	157	0.0010	159	-0.0048	139	0.0253	137	0.0183
196	0.1360	197	0.0072	195	-0.0038	170	0.0290	168	0.0273
224	0.1485	225	0.0100	222	-0.0025	197	0.0397	195	0.0333
252	0.1525	253	0.0150	250	-0.0025	225	0.0430	223	0.0343
278	0.1533	281	0.0181	276	-0.0030	254	0.0480	252	0.0340
308	0.1568	311	0.0205	306	-0.0025	406	0.0547	404	0.0368
330	0.1575	339	0.0215	328	-0.0040	468	0.0527	466	0.0370
359	0.1620	368	0.0262	357	-0.0055	516	0.0557	514	0.0373
383	0.1650	450	0.0320	388	-0.0032	-	-	-	-
391	0.1665	512	0.0328	453	-0.0015	-	-	-	-
455	0.1700	560	0.0375	515	-0.0030	-	-	-	-
517	0.1705	-	-	562	-0.0020	-	-	-	-
564	0.1718	-	-	-	-	-	-	-	-

TABLEAU J.2:RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES COMBINE AVEC DIVERS AJOUTS (PRISMES DE BETON, NORME CSA A23.2-14A)

AGE (JOURS)	T.-R. CTL EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. Li 0.5% EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. Li 1.0% EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. 2.07 Na EXP. (%)
0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
8	0.0023	7	-0.0023	7	0.0020	7	-0.0050
15	0.0015	24	-0.0010	24	0.0040	18	-0.0035
26	0.0028	47	0.0050	47	0.0060	32	0.0010
55	0.0165	77	0.0407	77	0.0140	56	0.0305
84	0.0500	105	0.0717	105	0.0227	84	0.0615
111	0.0840	134	0.0970	134	0.0297	112	0.0861
161	0.1213	162	0.1147	162	0.0323	140	0.0995
196	0.1360	190	0.1203	190	0.0356	153	0.1055
224	0.1485	217	0.1223	217	0.0408	195	0.1175
252	0.1525	245	0.1276	245	0.0469	223	0.1257
278	0.1533	314	0.1281	314	0.0553	255	0.1300
308	0.1568	379	0.1287	379	0.0657	287	0.1305
330	0.1575	431	0.1292	431	0.0677	307	0.1310
359	0.1620	-	-	-	-	339	0.1320
383	0.1650	-	-	-	-	371	0.1325
391	0.1665	-	-	-	-	446	0.1340
455	0.1700	-	-	-	-	508	0.1325
517	0.1705	-	-	-	-	586	0.1335
564	0.1718	-	-	-	-	-	-

TABLEAU J.3: RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES COMBINE AVEC DIVERS AJOUTS (PRISMES DE BETON, NORME CSA A23.2-14A)

AGE (JOURS)	T.-R. CTL EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. 10% PQ EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. 10% AC EXP. (%)	AGE (JOURS)	T.-R. 10% PC EXP. (%)
0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
8	0.0023	7	-0.0050	11	-0.0010	11	-0.0020
15	0.0015	18	-0.0045	16	-0.0015	16	-0.0030
26	0.0028	32	-0.0045	30	-0.0010	30	-0.0010
55	0.0165	56	0.0015	58	0.0030	58	0.0070
84	0.0500	84	0.0125	85	0.0045	85	0.0240
111	0.0840	112	0.0195	114	0.0110	114	0.0510
161	0.1213	140	0.0249	142	0.0160	142	0.0740
196	0.1360	153	0.0290	170	0.0240	170	0.0865
224	0.1485	195	0.0333	198	0.0330	198	0.0985
252	0.1525	223	0.0390	226	0.0400	226	0.1065
278	0.1533	255	0.0400	254	0.0475	254	0.1095
308	0.1568	287	0.0400	282	0.0520	282	0.1134
330	0.1575	307	0.0400	313	0.0555	313	0.1175
359	0.1620	335	0.0435	340	0.0540	340	0.1175
383	0.1650	364	0.0430	368	0.0550	368	0.1195
391	0.1665	446	0.0430	444	0.0575	444	0.1245
455	0.1700	508	0.0425	506	0.0570	506	0.1270
517	0.1705	556	0.0430	554	0.0560	554	0.1265
564	0.1718	-	-	-	-	-	-

TABLEAU J.4: RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LE GRANULAT D'OTTAWA COMBINE AVEC LA FUMEE DE SILICE CONDENSEE (PRISMES DE BETON, NORME CSA A23.2-14A)

AGE (JOURS)	OTT. CTL EXP. (%)	AGE (JOURS)	OTT. 5% FSC EXP. (%)	AGE (JOURS)	OTT. 10% FSC EXP. (%)	AGE (JOURS)	OTT. 15% FSC EXP. (%)
0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
6	0.0017	7	0.0050	8	0.0003	7	-0.0017
14	0.0067	14	0.0057	14	0.0027	13	0.0003
27	0.0093	28	0.0060	26	0.0033	27	0.0010
59	0.0203	56	0.0060	56	0.0036	56	0.0010
91	0.0313	87	0.0060	85	0.0038	84	0.0000
111	0.0473	115	0.0063	113	0.0037	107	0.0017
139	0.0690	142	0.0073	140	0.0037	139	0.0017
168	0.0887	170	0.0123	168	0.0040	167	0.0020
243	0.1170	239	0.0200	236	0.0042	235	0.0010
307	0.1210	303	0.0233	301	0.0043	300	0.0015
360	0.1233	356	0.0277	354	0.0050	353	-0.0007

TABLEAU J.5: RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LE GRANULAT D'OTTAWA COMBINE AVEC LE LAITIER SILICATE GRANULE (PRISMES DE BETON, NORME CSA A23.2-14A)

AGE (JOURS)	OTT. CTL EXP. (%)	AGE (JOURS)	OTT. 5% LSG EXP. (%)	AGE (JOURS)	OTT. 10% LSG EXP. (%)	AGE (JOURS)	OTT. 15% LSG EXP. (%)
0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
6	0.0017	7	0.0040	6	0.0050	7	0.0037
14	0.0067	14	0.0070	13	0.0063	14	0.0030
27	0.0093	28	0.0073	27	0.0090	28	0.0040
59	0.0203	57	0.0077	56	0.0117	56	0.0043
91	0.0313	87	0.0083	84	0.0153	86	0.0050
111	0.0473	114	0.0100	111	0.0140	115	0.0047
139	0.0690	142	0.0120	139	0.0140	150	0.0047
168	0.0887	168	0.0517	165	0.0173	224	0.0440
243	0.1170	231	0.0723	228	0.0600	289	0.0497
307	0.1210	296	0.0787	293	0.0703	342	0.0513
360	0.1233	349	0.0817	346	0.0723	-	-

TABLEAU J.6: RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LE GRANULAT DE SHERBROOKE COMBINE AVEC LA FUMEE DE SILICE CONDENSEE (PRISMES DE BETON, NORME CSA A23.2-14A)

AGE (JOURS)	SHE. CTL EXP. (%)	AGE (JOURS)	SHE. 5% FSC EXP. (%)	AGE (JOURS)	SHE. 10% FSC EXP. (%)	AGE (JOURS)	SHE. 15% FSC EXP. (%)
0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
7	0.0015	7	0.0000	7	-0.0013	6	-0.0107
15	0.0020	14	0.0020	14	-0.0003	13	-0.0070
28	0.0024	27	0.0043	28	-0.0007	28	-0.0047
57	0.0028	55	0.0043	56	0.0010	57	-0.0047
84	0.0050	81	0.0050	85	0.0013	93	-0.0050
117	0.0120	111	0.0057	114	0.0020	113	-0.0040
140	0.0208	164	0.0063	142	0.0020	141	-0.0037
169	0.0300	194	0.0077	171	0.0017	170	-0.0043
180	0.0340	250	0.0160	246	0.0057	245	-0.0030
199	0.0395	315	0.0173	311	0.0057	310	-0.0040
222	0.0420	367	0.0207	363	0.0057	362	-0.0027
252	0.0485	-	-	-	-	-	-
280	0.0545	-	-	-	-	-	-
309	0.0553	-	-	-	-	-	-
337	0.0598	-	-	-	-	-	-
365	0.0608	-	-	-	-	-	-
420	0.0630	-	-	-	-	-	-
496	0.0680	-	-	-	-	-	-
558	0.0710	-	-	-	-	-	-
606	0.0745	-	-	-	-	-	-

TABLEAU J.7: RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LE GRANULAT DE SHERBROOKE COMBINE AVEC LE LAITIER SILICATE GRANULE (PRISMES DE BETON, NORME CSA A23.2-14A)

AGE (JOURS)	SHE. CTL EXP. (%)	AGE (JOURS)	SHE. 5% LSG EXP. (%)	AGE (JOURS)	SHE. 10% LSG EXP. (%)	AGE (JOURS)	SHE. 15% LSG EXP. (%)
0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
7	0.0015	8	-0.0040	7	-0.0005	8	-0.0027
15	0.0020	14	-0.0050	14	-0.0003	14	-0.0040
28	0.0024	21	-0.0040	29	-0.0001	21	-0.0047
57	0.0028	28	-0.0030	56	0.0025	56	-0.0047
84	0.0050	56	-0.0020	84	0.0050	93	-0.0013
117	0.0120	84	0.0007	113	0.0090	112	0.0013
140	0.0208	112	0.0047	140	0.0120	174	0.0050
169	0.0300	174	0.0137	168	0.0150	-	-
180	0.0340	-	-	194	0.0200	-	-
199	0.0395	-	-	258	0.0280	-	-
222	0.0420	-	-	328	0.0327	-	-
252	0.0485	-	-	375	0.0340	-	-
280	0.0545	-	-	-	-	-	-
309	0.0553	-	-	-	-	-	-
337	0.0598	-	-	-	-	-	-
365	0.0608	-	-	-	-	-	-
420	0.0630	-	-	-	-	-	-
496	0.0680	-	-	-	-	-	-
558	0.0710	-	-	-	-	-	-
606	0.0745	-	-	-	-	-	-

TABLEAU J.8: RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LE GRANULAT DE SHERBROOKE COMBINE AVEC LE LAITIER AS (PRISMES DE BETON, NORME CSA A23.2-14A)

AGE (JOURS)	SHE. CTL EXP. (%)	AGE (JOURS)	SHE. 5% AS EXP. (%)	AGE (JOURS)	SHE. 10% AS EXP. (%)
0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
7	0.0015	8	-0.0020	7	-0.0080
15	0.0020	14	-0.0018	14	-0.0073
28	0.0024	29	0.0000	28	-0.0055
57	0.0028	58	0.0010	56	-0.0042
84	0.0050	85	0.0050	84	-0.0020
117	0.0120	113	0.0085	112	-0.0015
140	0.0208	141	0.0195	140	0.0003
169	0.0300	170	0.0300	191	0.0085
180	0.0340	185	0.0333	224	0.0152
199	0.0395	225	0.0462	252	0.0237
222	0.0420	253	0.0560	280	0.0330
252	0.0485	281	0.0590	308	0.0370
280	0.0545	309	0.0627	338	0.0420
309	0.0553	339	0.0630	360	0.0440
337	0.0598	367	0.0637	389	0.0460
365	0.0608	396	0.0655	420	0.0480
420	0.0630	479	0.0695	485	0.0523
496	0.0680	541	0.0698	547	0.0535
558	0.0710	588	0.0705	594	0.0541
606	0.0745	-	-	-	-

TABLEAU J.9: REDUCTION DES EXPANSIONS DES PRISMES DE BETON POUR LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES COMBINE AVEC DIVERS AJOUTS

AGE (JOURS)	T.-R. 5% FSC R.EXP(%)	T.-R. 10% FSC R.EXP(%)	T.-R. 5% LSG R.EXP(%)	T.-R. 10% LSG R.EXP(%)	T.-R. 0.5 Li R.EXP(%)	T.-R. 1.0% Li R.EXP(%)
100	108	109	86	81	4	60
200	94	102	78	80	12	74
300	87	102	68	78	18	65
400	83	102	67	78	17	57
500	81	102	67	78	-	-

TABLEAU J.10: REDUCTION DES EXPANSIONS DES PRISMES DE BETON POUR LE GRANULAT DE TROIS-RIVIERES COMBINE AVEC DIVERS AJOUTS

AGE (JOURS)	T.-R. 2.5% SC R.EXP(%)	T.-R. 2.07 Na R.EXP(%)	T.-R. 10% PQ R.EXP(%)	T.-R. 10% AC R.EXP(%)	T.-R. 10% PC R.EXP(%)
100	13	-9	76	89	46
200	14	17	75	76	28
300	10	16	74	65	27
400	13	20	74	67	22
500	12	23	75	67	19

TABLEAU J.11 : REDUCTION DES EXPANSIONS DES PRISMES DE BETON POUR LE GRANULAT D'OTTAWA COMBINE AVEC LA FSC ET LE LSG

AGE (JOURS)	OTT. 5% FSC R.EXP(%)	OTT. 10% FSC R.EXP(%)	OTT. 15% FSC R.EXP(%)	OTT. 5% LSG R.EXP(%)	OTT. 10% LSG R.E XP(%)	OTT. 15% LSG R.EXP(%)
100	84	91	97	77	63	87
200	86	96	99	44	63	72
300	81	96	99	35	42	59

TABLEAU J.12: REDUCTION DES EXPANSIONS DES PRISMES DE BETON POUR GRANULAT DE SHERBROOKE COMBINE AVEC LA FSC ET LE LSG

AGE (JOURS)	SHE. 5% FSC R.EXP(%)	SHE. 10% FSC R.EXP(%)	SHE. 15% FSC R.EXP(%)	SHE. 5% LSG R.EXP(%)	SHE. 10% LSG R.EXP(%)	SHE. 15% LSG R.EXP(%)
100	38	75	163	63	13	88
200	85	93	110	58	63	83
300	69	90	107	42	44	76

TABLEAU J.13: REDUCTION DES EXPANSIONS DES PRISMES DE BETON POUR LE GRANULAT DE SHERBROOKE COMBINE AVEC LE LAITIER AS

AGE (JOURS)	SHE. 5% AS R.EXP(%)	SHE. 10% AS R.EXP(%)
100	13	125
200	5	75
300	-13	35
400	-6	24
500	-3	22
600	5	27

TABLEAU J.14: CONCENTRATIONS DES IONS DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE DE PATES PURES AGEES DE 0 A 180 JOURS

AGE (JOURS)	Na (%)	K (%)	OH (%)	Ca (ppm)
0.04	0.76	1.02	0.36	625
0.13	0.83	1.06	0.37	632
1	0.87	1.21	0.87	90
4	1.24	1.76	0.73	66
5	0.99	1.45	0.61	63
7	0.99	1.45	0.61	47
8	0.99	1.45	0.60	41
14	1.13	1.60	0.63	99
21	1.10	1.64	0.78	86
180	1.29	1.88	0.70	50

TABLEAU J.15: CONCENTRATIONS DES IONS DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE DE PATES AVEC 10% DE FSC AGEES DE 0 A 180 JOURS

AGE (JOURS)	Na (%)	K (%)	OH (%)	Ca (ppm)
0.04	0.78	0.90	0.34	567
0.13	0.80	0.94	0.39	562
1	1.01	1.21	0.61	53
4	1.04	1.29	0.71	58
7	0.92	1.21	0.66	57
14	0.71	0.90	0.56	38
21	0.55	0.70	0.48	33
180	0.60	0.70	0.29	36

TABLEAU J.16: CONCENTRATIONS ET POURCENTAGES DE REDUCTION EN IONS DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE DES PATES AGEES DE 6 MOIS

AJOUT	Na (%)	RED. (%)	K (%)	RED. (%)	OH (%)	RED. (%)
CTL	1.28	0	1.89	0	0.70	0
FSC 5%	0.98	23	1.33	30	0.54	23
FSC 10%	0.59	54	0.71	62	0.29	59
FSC 15%	0.36	72	0.38	80	0.15	79
LSG 5%	1.22	5	1.83	3	0.65	7
LSG 10%	1.13	12	1.85	5	0.65	7
LSG 15%	1.13	12	1.45	23	0.64	9

TABLEAU J.17: TENEURS ET AUGMENTATION EN Na ET K DES PHASES SOLIDES DES PATES AGEES DE 6 MOIS

AJOUT	Na (%)	AUG. (%)	K (%)	AUG. (%)
CTL	0.09	0	0.10	0
FSC 5%	0.11	22	0.15	50
FSC 10%	0.17	89	0.25	150
FSC 15%	0.27	200	0.37	270
LSG 5%	0.09	1	0.09	-10
LSG 10%	0.11	22	0.10	1
LSG 15%	0.13	44	0.14	40

TABLEAU J.18: CONCENTRATIONS ET POURCENTAGES DE REDUCTION DES IONS DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE DES BETONS (A 6 MOIS)

ECHANTILLON	% AJOUT	Na %	RED. %	K %	RED. %	OH %	RED. %
CTL T-RIV.	0	0.87	0	0.81	0	0.41	0
LSG	5	1.03	-18	0.94	-16	0.37	10
LSG	10	0.78	10	0.58	28	0.32	22
CTL T-RIV.	0	0.87	0	0.81	0	0.41	0
FSC	5	0.92	-6	0.94	-15	0.37	10
FSC	10	0.50	43	0.48	41	0.26	37
ECHANTILLON	% AJOUT	Na %	RED. %	K %	RED. %	OH %	RED. %
CTL SHER.	0	0.71	0	0.74	0	0.40	0
LSG	5	0.76	-7	0.68	8	0.39	2.5
LSG	10	0.67	6	0.64	14	0.37	8
LSG	15	0.62	13	0.52	30	0.33	18
CTL SHER.	0	0.71	0	0.74	0	0.40	0
FSC	5	0.65	8	0.70	5	0.36	10
FSC	10	0.64	10	0.65	12	0.29	28
ECHANTILLON	% AJOUT	Na %	RED. %	K %	RED. %	OH %	RED. %
CTL OTTAWA	0	0.64	0	0.66	0	0.37	0
LSG	5	0.65	-1.5	0.56	15	0.31	16
LSG	10	0.66	-3	0.55	17	0.33	11
LSG	15	0.55	14	0.42	36	0.22	41
CTL OTTAWA	0	0.64	0	0.66	0	0.37	0
FSC	5	0.57	11	0.60	9	0.30	19
FSC	10	0.46	28	0.44	33	0.21	43

TABLEAU J.19: COEFFICIENTS DE PERMEABILITE DES BETONS (A 6 MOIS)

ECHANTILLON	Kc à P=4.9 kg/cm² (cm/s)	Kc à P=5.6 kg/cm² (cm/s)	Kc à P=6.3 kg/cm² (cm/s)	Kc à P=7.0 kg/cm² (cm/s)	Kc* Moy. (cm/s)	RED. PERM. Kc MOY. (%)
TR-CONTROLE	$2.9E^{-8}$	$3.2E^{-8}$	$3.4E^{-8}$	$3.6E^{-8}$	$3.3E^{-8}$	0
TR-5% LSG	$3.3E^{-8}$	$3.5E^{-8}$	$3.6E^{-8}$	$3.8E^{-8}$	$3.5E^{-8}$	-6
TR-10% LSG	$9.4E^{-9}$	$9.7E^{-9}$	$1.0E^{-8}$	$1.1E^{-8}$	$9.9E^{-9}$	70
TR-5% FSC	$1.7E^{-9}$	$1.8E^{-9}$	$2.0E^{-9}$	$2.1E^{-9}$	$1.9E^{-9}$	94
TR-10% FSC	$3.4E^{-9}$	$3.5E^{-9}$	$3.6E^{-9}$	$3.6E^{-9}$	$3.5E^{-9}$	89
TR-0.5% Li	$1.7E^{-8}$	$1.8E^{-8}$	$1.8E^{-8}$	$1.9E^{-8}$	$1.8E^{-8}$	45
TR-1.0% Li	$1.8E^{-9}$	$1.9E^{-9}$	$2.0E^{-9}$	$2.2E^{-9}$	$2.0E^{-9}$	39
OT-CONTROLE	$3.6E^{-9}$	$4.0E^{-9}$	$4.4E^{-9}$	$4.8E^{-9}$	$4.2E^{-9}$	0
OT-5% LSG	$3.8E^{-9}$	$4.2E^{-9}$	$4.3E^{-9}$	$4.7E^{-9}$	$4.2E^{-9}$	-1.7
OT-10% LSG	$7.1E^{-10}$	$9.0E^{-10}$	$1.1E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	$1.0E^{-9}$	76
OT-15% LSG	$4.8E^{-9}$	$5.1E^{-9}$	$5.3E^{-9}$	$5.5E^{-9}$	$5.2E^{-9}$	-24
OT-5% FSC	$1.1E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	$1.4E^{-9}$	$1.5E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	69
OT-10% FSC	$2.3E^{-9}$	$2.5E^{-9}$	$2.7E^{-9}$	$2.9E^{-9}$	$2.6E^{-9}$	38
OT-15% FSC	$2.0E^{-9}$	$2.1E^{-9}$	$2.3E^{-9}$	$2.5E^{-9}$	$2.2E^{-9}$	48
SH-CONTROLE	$2.3E^{-9}$	$2.4E^{-9}$	$2.4E^{-9}$	$2.5E^{-9}$	$2.4E^{-9}$	0
SH-5% LSG	$1.4E^{-9}$	$1.5E^{-9}$	$1.6E^{-9}$	$1.7E^{-9}$	$1.5E^{-9}$	40
SH-10% LSG	$1.4E^{-9}$	$1.6E^{-9}$	$1.7E^{-9}$	$1.8E^{-9}$	$1.6E^{-9}$	36
SH-15% LSG	$1.4E^{-9}$	$1.5E^{-9}$	$1.6E^{-9}$	$1.7E^{-9}$	$1.5E^{-9}$	40
SH-5% FSC	$1.2E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	$1.4E^{-9}$	$1.3E^{-9}$	48
SH-10% FSC	$9.0E^{-10}$	$9.4E^{-10}$	$1.0E^{-9}$	$1.1E^{-9}$	$9.9E^{-10}$	60
SH-15% FSC	$9.1E^{-10}$	$1.0E^{-9}$	$1.1E^{-9}$	$1.2E^{-9}$	$1.0E^{-9}$	60

*Kc: Coefficient de perméabilité

TABLEAU J.20: RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION POUR LES SABLES (ESSAI ASTM C-227, BARRES DE MORTIER)

AGE (JOURS)	ST-FELIX E/C 0.38 EXP(%)	ST-FELIX E/C 0.50 EXP(%)	TEMISCA. E/C 0.38 EXP(%)	TEMISCA. E/C 0.50 EXP(%)
0	0.000	0.000	0.000	0.000
7	-0.001	-0.003	-0.002	-0.005
21	0.004	0.005	0.000	0.005
51	0.007	0.008	0.001	0.004
77	0.007	0.007	-0.001	0.003
105	0.008	0.006	-0.001	0.005
133	0.010	0.070	0.000	0.006
162	0.012	0.010	0.005	0.010
192	0.011	0.007	0.004	0.006
219	0.010	0.008	0.005	0.007
247	0.011	0.005	0.007	0.007

TABLEAU J.21: INTENSITES RELATIVES DES PICS DES ANALYSES PAR DIFFRACTIONS-X DES PATES AVEC AJOUTS (À 6 MOIS)

d (Å)	2θ ($Cu_{k\alpha}$)	CTL	FSC 5%	FSC 10%	FSC 15%	LSG 5%	LSG 10%	LSG 15%
9.72	9.10	15	19	15	11	13	13	20
5.63	15.75	12	12	13	13	11	16	14
4.93	18.00	100	61	44	9	81	103	76
4.72	18.80	6	9	6	8	6	5	9
3.88	22.90	16	16	13	11	14	16	14
3.11	28.66	26	20	17	16	23	21	15
3.03	29.50	26	26	33	27	31	22	23
2.78	32.15	13	13	22	13	15	13	16
2.77	32.30	18	22	23	16	15	19	19
2.63	34.05	100	75	45	22	104	84	83
2.56	35.00	12	12	9	10	14	10	12
2.21	40.80	9	6	11	11	6	9	12
1.93	47.10	41	31	25	11	43	47	33
1.83	49.80	6	9	11	11	8	9	11
1.80	50.70	31	25	18	9	26	27	19
1.77	51.75	6	8	9	6	3	4	9
1.69	54.30	16	9	11	5	14	13	13
1.66	55.30	3	4	4	5	1	6	8

TABLEAU J.22: VARIATION DES DIVERS PARAMETRES EN FONCTION DU POURCENTAGE D'AJOUTS

ECHANTILLON	% AJOUT	RED. EXP. (%)	RED. Na (%)	RED. K (%)	RED. OH (%)	RED. PERM. (%)	RED. CH (%)	AUG. RES. (%)
LSG T.-RIV.	5	79	-18	-16	-6	-6	15	19
LSG	10	81	10	28	70	70	19	40
FSC T.-RIV.	5	93	-6	-15	10	10	41	40
FSC	10	104	43	41	37	37	56	47
ECHANTILLON	% AJOUT	RED. EXP. (%)	RED. Na (%)	RED. K (%)	RED. OH (%)	RED. PERM. (%)	RED. CH (%)	AUG. RES. (%)
LSG SHER.	5	58	-7	8	2.5	40	-4	5
LSG	10	64	6	14	8	36	7	-1
LSG	15	84	13	30	18	40	18	-5
FSC SHER.	5	85	8	5	10	48	14	14
FSC	10	92	10	12	28	60	39	32
FSC	15	110	-	-	-	60	61	48
ECHANTILLON	% AJOUT	RED. EXP. (%)	RED. Na (%)	RED. K (%)	RED. OH (%)	RED. PERM. (%)	RED. CH (%)	AUG. RES. (%)
LSG OTTAWA	5	44	-1.5	15	16	16	-9	6
LSG	10	67	-3	17	11	11	9	15
LSG	15	72	14	36	41	41	14	24
FSC OTTAWA	5	86	11	9	19	69	27	39
FSC	10	96	28	33	43	38	50	45
FSC	15	99	-	-	-	48	59	54